



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título

Monitorización de un elevador industrial y análisis de su estado en función de las vibraciones de sus componentes mecánicas

Autor/es

LAVINIA CONSTANTA GIURCA

Director/es

JOSÉ ANTONIO ALBA IRURZUN , ANA GONZÁLEZ MARCOS y ALFONSO DE LA LLERA JAIME ,

Facultad

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Titulación

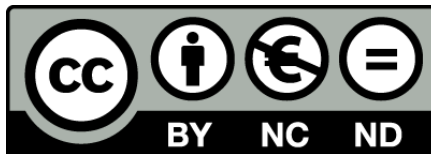
Grado en Ingeniería Mecánica

Departamento

INGENIERÍA MECÁNICA

Curso académico

2018-19



Monitorización de un elevador industrial y análisis de su estado en función de las vibraciones de sus componentes mecánicas, de LAVINIA CONSTANTA GIURCA

(publicada por la Universidad de La Rioja) se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported. Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

CURSO: 2018/2019

CONVOCATORIA: SEPTIEMBRE

TÍTULO:

**Monitorización de un elevador industrial y análisis de su
estado en función de las vibraciones de sus
componentes mecánicos**

AUTOR: Lavinia Constanta Giurca

DIRECTOR/ES: Ana González Marcos
José Antonio Alba Irurzun
Alfonso de la Llera Jaime

DEPARTAMENTO: Ingeniería Mecánica

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Objetivos.....	10
1.2. Presentación de la empresa	10
1.2.1. Descripción.....	10
1.2.2. Procesos.....	11
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ANALIZADO	17
2.1. Introducción	17
2.2. Descripción.....	17
2.3. Fallos y plan de mantenimiento en la actualidad	21
2.3.1. Histórico de fallos	21
2.3.2. Plan de mantenimiento preventivo	23
3. VIBRACIONES EN EL ÁMBITO DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL .	25
3.1. Concepto de vibración	25
3.2. Instrumentos de medida de vibraciones	25
3.2.1. Sensores	25
3.2.2. Colocación de sensores	27
3.2.3. Aparatos de medida de vibraciones.....	29
3.3. Causas de fallo en máquinas rotativas.....	30
3.3.1. Desequilibrio.....	30
3.3.2. Excentricidad.....	32
3.3.3. Eje doblado.....	32
3.3.4. Desalineación.....	33
3.3.5. Holguras.....	34
3.3.6. Rodamientos.....	34

3.3.7. Desgaste mecánico.....	35
4. MÉTODO SPM HD	36
4.1. Introducción	36
4.2. Impulsos de choque	36
4.3. El transductor del impulso de choque.....	37
4.4. Normalización de la amplitud del impulso de choque.....	39
4.5. SPM HD.....	40
5. MÉTODO HD ENV	43
5.1. Introducción	43
5.2. Principios físicos básicos.....	43
5.3. Los cuatro estadios de rotura de un rodamiento	44
5.4. Pasos seguidos en la metodología HD ENV	45
6. IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE VIBRACIONES E IMPULSOS DE CHOQUE.....	48
6.1. PUESTA EN MARCHA.....	52
7. CONCLUSIONES	103
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXO A. PLAN DE MANTENIMIENTO.....	110
ANEXO B. TENDENCIAS VIB, HDm y HDc.....	113
ANEXO C. DIAGRAMAS DE CAJAS	129
ANEXO D. MATRICES DE GRÁFICOS DE DISPERSIÓN.....	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista aérea Fábrica de Vitoria.	11
Figura 2. Procesos cota 0.	15
Figura 3. Procesos cota 6.	16
Figura 4. Elementos elevador 1.....	19
Figura 5. Elementos elevador 1.....	20
Figura 6. Elementos elevador 2.....	20
Figura 7. Rotura soldadura tambor.....	21
Figura 8. Rotura soldadura tambor.....	22
Figura 9. Unión eje-acoplamiento.....	22
Figura10. Pinza	22
Figura 11. Acelerómetro Duo Tech en silleta.	28
Figura 12. Acelerómetro Duo Tech reductora.	28
Figura 13. Comportamiento del transductor del impulso de choque. (Fuente: Sundström, 2010).....	38
Figura 14. Obtención del valor de HDc (Fuente: Sundström, 2010).....	41
Figura 15. Entradas y salidas SPM HD (Fuente: Sundström, 2010).	41
Figura 16. Pasos metodología SPM HD. (Fuente: Sundström, 2010).	42
Figura 17. Propagación ondas elásticas causado por impacto. (Fuente: Sundström, 2015).....	44
Figura 18. Comportamiento típico de rotura estadios 1y 2. (Fuente: Sundström, 2010).	45
Figura 19. Estadios de rotura de un rodamiento. (Fuente: Sundström, 2010)..	45
Figura 20. Pasos metodología HD ENV. (Fuente: Sundström, 2010).	46
Figura 21. Procesamiento de la señal metodología HD ENV.....	47
Figura 22. Distribución de sensores.	51
Figura 23. Cronograma seguimiento.	54
Figura 24. Tendencia HDm punto 1.	57
Figura 25. Tendencia HDm punto 16.	59
Figura 26. Tendencia HDm punto 2.	60
Figura 27. Tendencia VIB punto 16.....	62

Figura 28. Tendencia HDc punto 1.....	63
Figura 29. Tendencia HDm punto 4.	65
Figura 30. Tendencia VIB punto 9.....	67
Figura 31. Tendencia VIB punto 16 – instantáneos.....	70
Figura 32. Tendencia HDm punto 1 – instantáneos.	72
Figura 33. Tendencia HDm punto 9 – lado motriz.	74
Figura 34. Tendencia HDm punto 10 – lado motriz.	75
Figura 35. Tendencia HDm punto 16 – instantáneos.	76
Figura 36. Tendencia VIB punto 16 - instantáneos.	78
Figura 37. Tendencia HDm punto 4 – instantáneos.	80
Figura 38. Diagrama de cajas – Tendencia HDm punto 1.....	82
Figura 39. Diagrama de cajas – Tendencia HDm punto 16.....	84
Figura 40. Diagrama de cajas - Tendencia HDm punto 9.	86
Figura 41. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 1.....	89
Figura 42. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 16.....	91
Figura 43. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 9.....	93
Figura 44. Relaciones entre las variables disponibles para el sensor 1 del elevador 1.....	95
Figura 45. Relaciones entre las variables disponibles para el sensor 9 del elevador 2.....	96
Figura 46. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de tres segundos para el sensor 1 del elevador 1.....	99
Figura 47. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de cinco segundos para el sensor 9 del elevador 2	101
Figura 48. Conclusiones comportamiento elevadores.....	105
Figura 49. Tendencia VIB punto 1.....	114
Figura 50. Tendencia VIB punto 4.....	115
Figura 51. Tendencia VIB punto 5.....	116
Figura 52. Tendencia VIB punto 8.....	117
Figura 53. Tendencia VIB punto 12.....	118
Figura 54. Tendencia VIB punto 13.....	119

Figura 55. Tendencia HDm punto 5.	121
Figura 56. Tendencia HDm punto 8.	122
Figura 57. Tendencia HDm punto 12.	123
Figura 58. Tendencia HDm punto 13.	124
Figura 69. Tendencia HDc punto 8.....	126
Figura 60. Tendencia HDc punto 9.....	127
Figura 61. Tendencia HDc punto 16.....	128
Figura 62. Diagrama de cajas - Tendencia HDm punto 4.	130
Figura 63. Diagrama de cajas – Tendencia HDm punto 8.....	131
Figura 64. Diagrama de cajas – Tendencia HDm punto 13.....	132
Figura 65. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 4.	134
Figura 66. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 8.	135
Figura 67. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 13.	136
Figura 68. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de tres segundos para el sensor 4 del elevador 1.....	138
Figura 69. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de tres segundos para el sensor 5 del elevador 1.....	139
Figura 70. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de tres segundos para el sensor 8 del elevador 1.....	140
Figura 71. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de cinco segundos para el sensor 12 del elevador 2.	141
Figura 72. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de cinco segundos para el sensor 13 del elevador 2.	142
Figura 73. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de cinco segundos para el sensor 16 del elevador 2.	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetro E1	18
Tabla 2. Parámetros E2	18
Tabla 3. Características acelerómetro Duo Tech.	27
Tabla 4. Valores predefinidos (1).	55
Tabla 5. Promedio mediciones (1).....	56
Tabla 6. Promedio mediciones (2).....	64
Tabla 7. Valores predefinidos (2).	68
Tabla 8. Número de medidas disponibles para el elemento 1 del elevador 1, en función del tamaño de la ventana temporal analizada. Se presentan las distintas variables de forma independiente y en común.	97
Tabla 9. Número de medidas disponibles para el elemento 9 del elevador 2, en función del tamaño de la ventana temporal analizada. Se presentan las distintas variables de forma independiente y en común.	97

RESUMEN

Ante la necesidad de optimizar el rendimiento de dos elevadores industriales en la fábrica Mercedes-Benz, S.A.U. (Vitoria-Gasteiz), más concretamente en la zona de Ceras del Área de Pintura (dentro del cual se desarrolla el presente TFG), se le encomienda a la autora de este Proyecto la implementación de un sistema de monitorización que permita analizar el comportamiento de estos elevadores a partir de las vibraciones e impulsos de choque de sus componentes mecánicos. De esta forma, el objetivo que se persigue es poder predecir en qué momento puede producirse un fallo (y de qué tipo es) y anticiparse al mismo. Para ello, se procede a la sensorización de los elementos mecánicos más críticos y, a continuación, se emplea el software Condmaster Ruby (2019) que recibe las mediciones realizadas por los sensores, las almacena y genera avisos o alarmas para informar del estado de los elevadores. Una vez implementado el sistema y comprobado que funciona correctamente, se realiza un análisis con todos los datos obtenidos (mediciones) y se estudia su evolución para conocer cómo se comportan los elementos de ambos elevadores frente a las vibraciones e impactos que se produzcan. Se puede concluir afirmando que, gracias a este Proyecto, se ha contribuido a asentar las bases para la implementación de un mantenimiento predictivo no sólo en estos elevadores, sino también en otros equipos de la factoría, y que permita reducir los tiempos de parada en las líneas y los costes asociados a estas paradas.

ABSTRACT

Due to the need to optimize the performance of two industrial elevators at Mercedes-Benz, S.A.U. (Vitoria-Gasteiz), more specifically at the Waxes zone at the Painting Area (in which this TFG is developed), the author of this Project is entrusted with the implementation of a monitoring system that allows the analysis of the behaviour of these elevators from the vibrations and shock impulses of their mechanical components. In this way, the aim of this work is to be able to predict when a failure may occur (and what type it is) and anticipate it. To do this, the most critical mechanical elements are sensorized and then the Condmaster Ruby (2019) software is used to receive the measures of the sensors, store them and generate warnings or alarms to report the status of the elevators. Once the system has been implemented and verified that it works correctly, an analysis is carried out with all the data obtained (measurements) and its evolution is studied in order to know how the elements of both elevators behave depending on the vibrations and impacts produced. It can be concluded that, thanks to this study, the foundations have been laid for the implementation of predictive maintenance not only on these elevators, but also in other factory equipment, which will allow the reduction of line downtime and the costs associated with these stops.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto descrito en esta memoria hace referencia a la realización del Trabajo Fin de Grado (TFG) del Grado en Ingeniería Mecánica, desarrollado en la planta de Mercedes-Benz en Vitoria, en el Departamento de Mantenimiento de Pintura.

La misión del Departamento de Mantenimiento es conservar los bienes productivos en las condiciones óptimas, seguras y preestablecidas de funcionamiento con la finalidad de evitar, reducir o reparar los fallos, reducir los tiempos de paro y evitar incidentes aumentando la seguridad de las personas. Para ello se emplea el tipo de mantenimiento más conveniente según la situación.

El mantenimiento correctivo, de carácter urgente, se emplea en averías que necesiten una reparación inmediata para evitar interrumpir la producción; el mantenimiento preventivo para conservar equipos e instalaciones mediante revisiones y limpiezas periódicas; y el mantenimiento predictivo para conocer continuamente el estado de los equipos mediante el seguimiento de distintas variables (vibraciones, temperaturas, energía consumida, etc.) y actuar en consecuencia cuando sus valores indiquen un fallo inminente. El conjunto de tareas preventivas y predictivas a realizar por equipo o grupo de equipos se denomina plan de mantenimiento.

En este contexto, se detecta la necesidad de mejora del plan de mantenimiento de dos elevadores industriales, con la finalidad de detectar de manera precoz los daños en rodamientos, silletas, moto-reductoras y el nivel de lubricación en dichos elementos. De esta manera se consigue disponer de más tiempo para planear reposiciones, reparaciones o revisiones generales; prolongar la vida útil de los elementos, reducir el riesgo de accidente laboral, reducir los costes a largo plazo a pesar de la considerable inversión inicial, etc.

Una de las formas más extendidas para determinar la salud de los equipos rotativos es a través del monitorizado de las vibraciones que se producen en los distintos elementos que conforman la máquina. Considerando los costes de reparación o sustitución, pérdida de producción, problemas de calidad, impacto

medioambiental y otros efectos negativos del deterioro de la condición de la máquina, la implementación del monitorizado de la vibración está bien justificada.

A continuación, se presentan los objetivos del proyecto y la empresa en la que se realiza.

1.1. Objetivos

El objetivo de este proyecto es realizar un análisis de la monitorización de dos elevadores industriales mediante un sistema online que detecta las vibraciones e impulsos de choque de sus componentes mecánicos, identificando en que elemento se produce, permitiendo anticiparse al fallo.

Se estudiará el comportamiento de los elementos en distintas circunstancias para llegar a predecir en qué momento se producirá el fallo y de qué tipo será, permitiendo una mejor planificación del mantenimiento preventivo.

Por último, a modo de conclusión, se presentarán las ventajas y desventajas de la implementación de este sistema.

1.2. Presentación de la empresa

1.2.1. Descripción

Mercedes-Benz es una marca alemana de automóviles, furgonetas, autobuses y camiones de la compañía Daimler AG, y es el fabricante de automóviles más antiguo del mundo. Daimler AG está compuesta por cinco divisiones: Mercedes-Benz Cars, Daimler Trucks, Mercedes-Benz Vans, Daimler Buses y Daimler Financial Services.

La fábrica de Mercedes-Benz de Vitoria, en Álava (País Vasco), se inauguró en 1954, está especializada en furgonetas y ha superado los 1,8 millones de vehículos fabricados en toda su trayectoria. Forma parte del Grupo Daimler, concretamente de la división de Vans.

Los modelos que se están fabricando actualmente son la Vito y Clase V y empezaron a producirse entre marzo y agosto de 2014.

La planta de Mercedes-Benz Vitoria está dividida en tres naves, Montaje Bruto donde se fabrica la carrocería, Pintura donde se le da color y Montaje final donde se equipa. Actualmente tiene una extensión de 600.000 m², 370.000 m² dedicados a la producción y unas 5000 personas trabajando en las instalaciones.



Figura 1. Vista aérea Fábrica de Vitoria.

En la línea de producción se trabaja a 3 turnos productivos, de lunes a viernes y algunos sábados 1 turno. En el Departamento de Mantenimiento también se trabaja a tres turnos durante la semana y las mañanas de los fines de semana se trabaja 1 turno.

Hay tres paradas de la producción establecidas a lo largo del año: Semana Santa, 10 días en agosto y las fiestas de Navidad. El Departamento de Mantenimiento aprovecha estas paradas para realizar las intervenciones que requieren parada en las instalaciones.

1.2.2. Procesos

Los principales procesos que se desarrollan en la fábrica son los siguientes:

- Ensamblaje de las diferentes piezas que forman la carrocería del vehículo, llevado a cabo en estaciones robotizadas de soldadura, en el Departamento de Montaje Bruto.

- Protección de las carrocerías contra la corrosión, sellado y pintura de las mismas, llevado a cabo en el Departamento de Pintura, dentro del cual se desarrolla el presente TFG.
- Montaje de todos los elementos del vehículo a la carrocería, llevado a cabo en el Departamento de Montaje Final.

El proceso de pintura comienza con la limpieza de la carrocería proveniente de Montaje Bruto y termina con la aplicación de la cera en los cuerpos huecos de la carrocería antes de la entrada a la nave de Montaje Final (Figuras 2 y 3)¹.

Las carrocerías de Montaje Bruto se detienen en un pulmón de selección, desde donde se introducen al proceso de Pintura.

El primer proceso por el que pasan es el tratamiento químico por inmersión (TTS) (1), cuyo objetivo es mejorar la adherencia de la imprimación por cataforesis y aplicar protección anticorrosiva. Consiste en una serie de baños de desengrase y lavados que eliminan el aceite de embutición proveniente del proceso de Montaje Bruto; un baño de activado y de fosfatado que confiere a la carrocería la protección anticorrosiva mediante una formación de una capa de micro-cristales en la superficie; y lavados finales con agua desmineralizada.

Tras el proceso de TTS, la carrocería se detiene en un pulmón, desde el que entra al proceso de Imprimación por cataforesis (KTL) (2). Con este proceso se dota a la carrocería de una película uniforme de pintura, incluso en los interiores y cuerpos huecos, aportando una gran protección anticorrosiva. Las carrocerías, previamente contactadas eléctricamente, se sumergen en una cuba donde transcurre la electrodeposición catódica de pintura. Después se procede a varios lavados y un soplado para eliminar sobrantes de pintura. Finalmente se realiza el horneado, para que la pintura polimerice y sea resistente.

Del proceso de KTL, las carrocerías pasan a la zona de Sellados, Insonorización y Protección de Bajos (3).

¹ Cota 0 hace referencia a la planta baja del proceso de producción y cota 6 a la primera planta.

Los sellados tienen como objetivo no permitir las entradas de agua en los solapes de chapa para evitar puntos de corrosión y dar estanqueidad al habitáculo.

La insonorización evita la entrada de ruidos al habitáculo.

La protección de bajos debe proteger el KTL, y por lo tanto la carrocería, del golpe de piedra para evitar puntos de corrosión.

Estos tres procesos cuentan con unas partes manuales y otras automáticas.

Una vez protegida la carrocería, se procede a la aplicación de apresto hidrosoluble (4). Con este proceso se aumentan las propiedades mecánicas de las capas de pintura, se protege la carrocería frente a los rayos UV y se mejora la adherencia entre la imprimación cataforética y el esmalte final. Para ello se dispone de una cabina semiautomática. Posteriormente se pasa la carrocería por un horno. En la línea de Control de Apresto se detectan y eliminan pequeños defectos antes del proceso de esmalte.

En el proceso de Esmalte (5) se aplica pintura tanto en el interior como en el exterior de la carrocería. Para su ejecución, se dispone de tres líneas de esmaltado con cabinas dotadas de máquinas automáticas para el pintado de las superficies externas. Para el curado del esmalte, se procede al horneado.

La línea de Finish (6), o control de Esmalte, tiene como finalidad el control, el registro y si procede el repaso de defectos provenientes de los procesos anteriores. En función de la problemática de la carrocería, la acción puede ser:

- Repasos en línea, pulidos.
- Repasos en boxes, pequeños retrabajos de pintura.
- Línea de lijados para segunda vuelta donde se prepara la carrocería para enviarla nuevamente al proceso de Esmaltado.

Se realiza un control 100% de todas las carrocerías. El control es automático mediante el Túnel de Control Superficial (7), y manual para aquellas zonas que el túnel no detecta.

Tras la verificación del buen estado de la carrocería, se colocan los anagramas (8), en función del código del vehículo.

Por último, y antes de pasar a la nave de Montaje Final, se procede a la Aplicación de Ceras (9) para la protección de los cuerpos huecos.

El objetivo de este proceso es aumentar la protección anticorrosiva en los cuerpos huecos mediante la aplicación de ceras que eviten el contacto del agua con la imprimación cataforética. Para ello se dispone de una instalación automática que aplica la cera mediante boquillas por orificios de la carrocería. Posteriormente se realiza un horneado para el escurrido del producto.

Una vez finalizado el proceso de la nave de Pintura, se almacenan las carrocerías en un pulmón que conecta las instalaciones de Pintura con las de Montaje Final.

Los elevadores que se estudian desempeñan su actividad entre la zona de Aplicación de Ceras (cota 6) y la zona de Anagramas (cota 0).

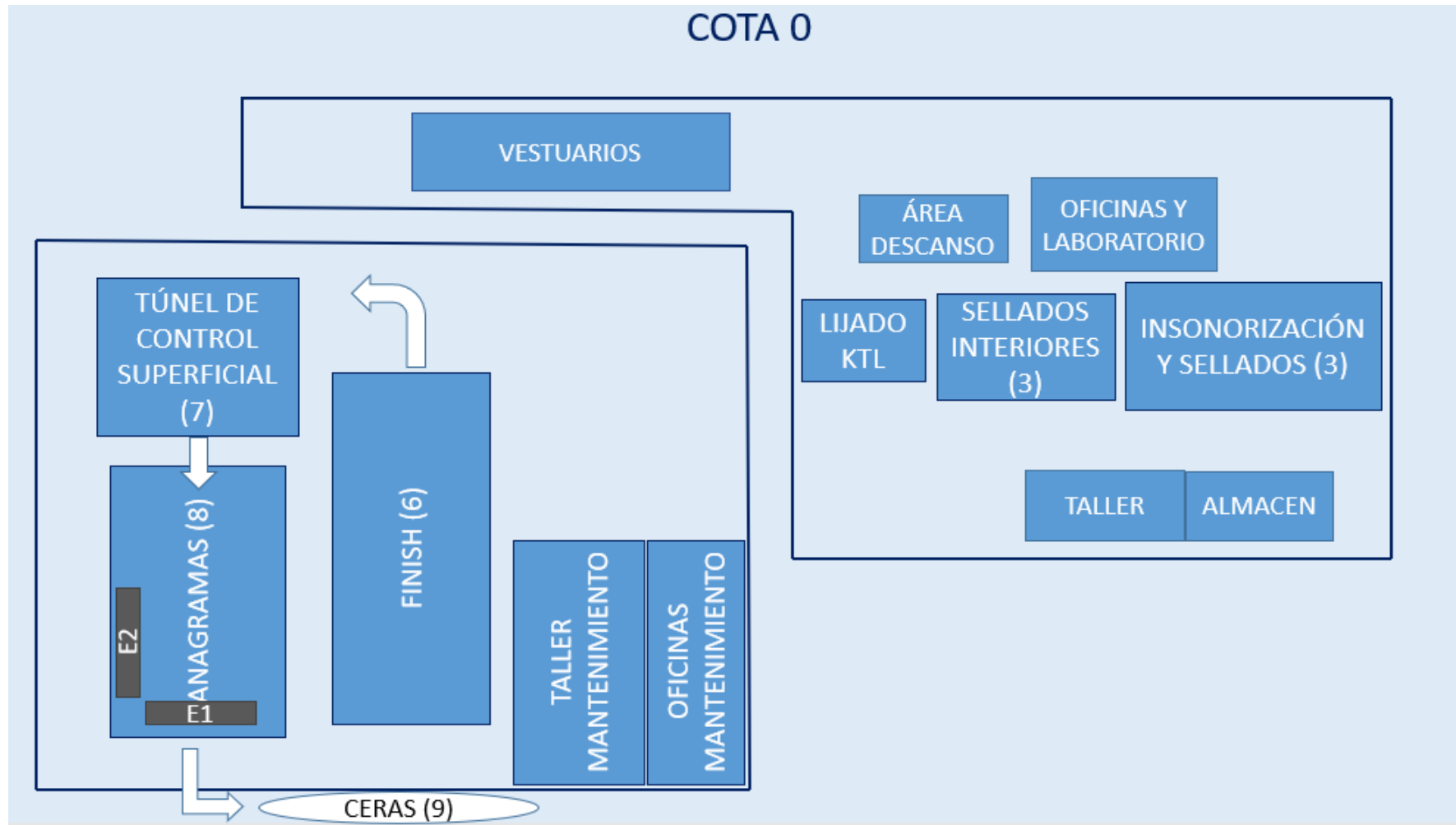


Figura 2. Procesos cota 0.

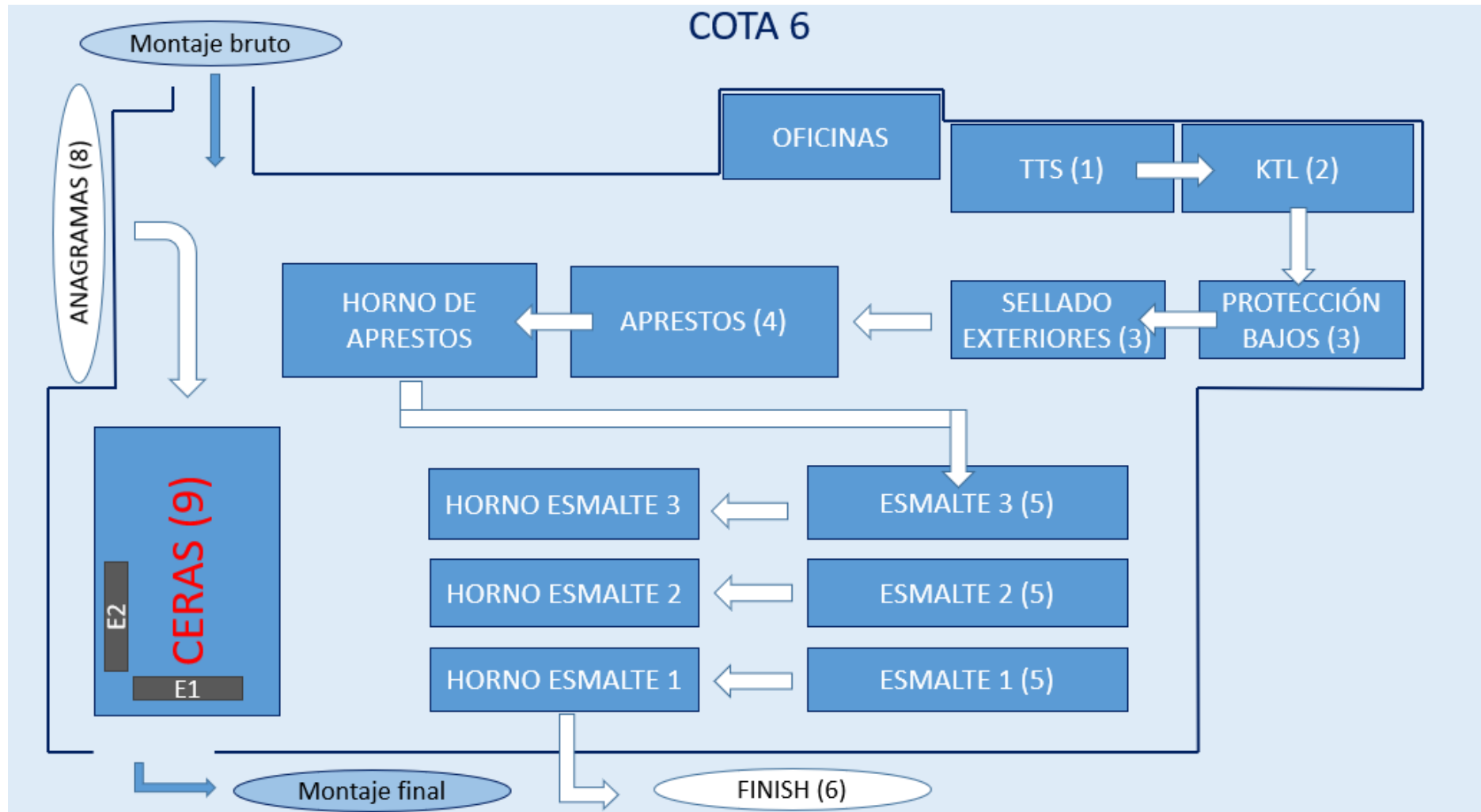


Figura 3. Procesos cota 6.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ANALIZADO

2.1. Introducción

Se desea monitorizar dos elevadores industriales mediante técnicas de medición para detectar las vibraciones e impulsos de choque de sus componentes mecánicos, identificar en cuál se produce y anticiparse al fallo, con la finalidad de disponer de más tiempo para planear reposiciones, prolongar la vida útil de los elementos y reducir los costes a largo plazo.

El elevador industrial es un sistema de transporte vertical, diseñado para desplazar objetos entre los distintos niveles de las instalaciones de una nave industrial. Está formado por partes mecánicas, eléctricas y electrónicas que funcionan conjuntamente para ponerlo en marcha. El hecho de que un elevador industrial realice un buen desempeño es fundamental para el correcto funcionamiento del proceso de producción.

2.2. Descripción

Como se ha señalado en el apartado 1.2.2. los elevadores que se analizan están ubicados en la zona de aplicación de ceras. Se trata de dos elevadores industriales que cargan la carrocería para pasarla de un proceso a otro.

El primer elevador, codificado como “11EL090G” (en adelante, elevador 1) lleva aproximadamente 1 año instalado, motivo por el que no tiene historial de fallos. Está ubicado en la cota 6 y realiza un movimiento de bajada de la carrocería hasta la cota 0. La subida se realiza sin carrocería.

El segundo elevador, codificado como “01EL008G” (en adelante, elevador 2) lleva varios años funcionando. Está ubicado en la cota 6 y realiza un movimiento de subida de la carrocería desde la cota 0 hasta la cota 6. La bajada se realiza sin carrocería.

Ambos elevadores se desplazan con un movimiento con velocidad variable, es decir, se parte desde el reposo y se produce un incremento paulatino de la velocidad hasta que se alcanza una velocidad máxima constante durante unos

pocos segundos. Posteriormente se produce un decremento paulatino de la velocidad hasta el reposo.

En la siguiente tabla se observan las características del desplazamiento de cada uno de los elevadores:

Elevador 1	Bajada	Subida
Velocidad máxima (RPM)	23,9	26,9
Tiempo (s)	14,5	14
Estado	Cargado	Vacío

Tabla 1. Parámetro E1

Elevador 2	Bajada	Subida
Velocidad máxima (RPM)	37,8	38
Tiempo (s)	12,5	11,5
Estado	Vacío	Cargado

Tabla 2. Parámetros E2

Ambos elevadores están constituidos por los mismos elementos:

- Conjunto de elementos mecánicos que permiten el desplazamiento vertical. Estos elementos son el motor, la reductora, el sistema de acoplamiento, la silleta y el tambor.
- Columna de elevación y anclaje que sostienen al conjunto de elementos mecánicos.
- Carro elevación-deslizamiento donde va colocado el skid² (la carrocería tiene un peso de 750 kg y se acopla al skid). El peso del skid es de 400 kg.
- Contrapeso. Su función es equilibrar la carga para facilitar el trabajo del motor y no forzarlo en su funcionamiento. La masa del contrapeso es

² Estructura que transporta la carrocería del vehículo a lo largo de la línea de fabricación.

igual a la del skid, más la mitad de la carga máxima autorizada. En este caso es de 750 kg.

El número de ciclos diarios que realiza cada elevador depende de la producción diaria (quedan incluidas las paradas por avería, paradas por acumulación de carrocería en algún proceso, paradas por descanso de turno, etc.)

A continuación, se pueden observar los elementos mecánicos de cada elevador:



Figura 4. Elementos elevador 1.



Figura 5. Elementos elevador 1.

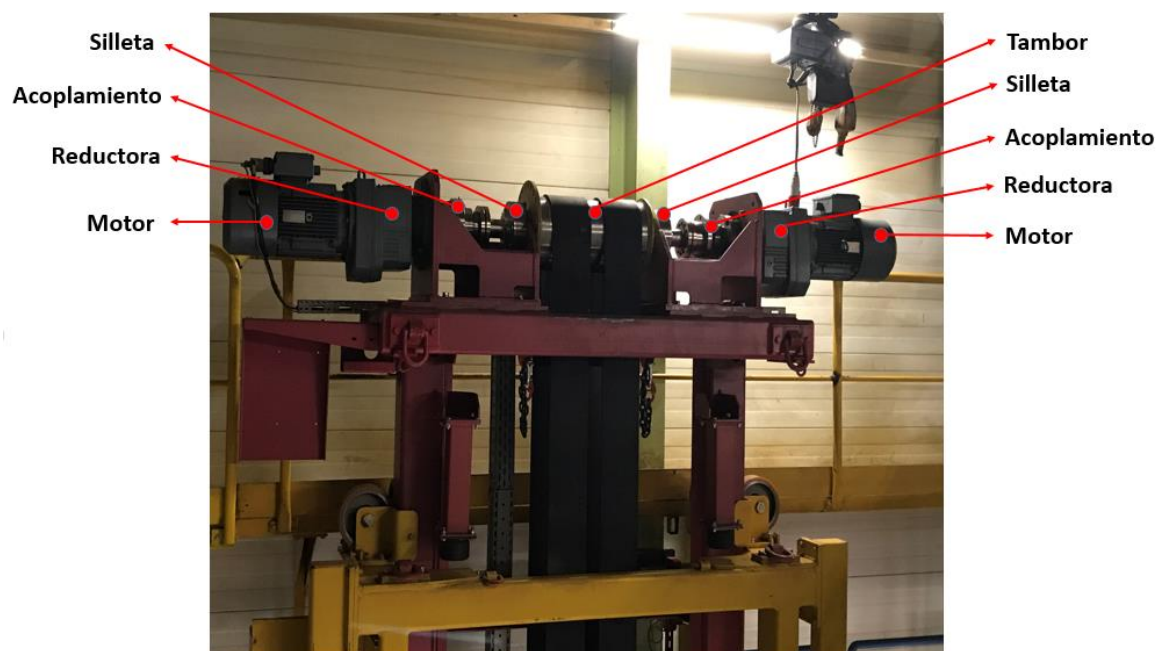


Figura 6. Elementos elevador 2.

2.3. Fallos y plan de mantenimiento en la actualidad

2.3.1. Histórico de fallos

Para garantizar una buena productividad y eficiencia es imprescindible conocer los fallos típicos que se pueden dar en los equipos de la instalación y tener un plan de mantenimiento con el objetivo de retrasar o evitar las averías.

Los fallos más comunes producidos en los elevadores de la planta se presentan a continuación:

- Rotura de soldadura

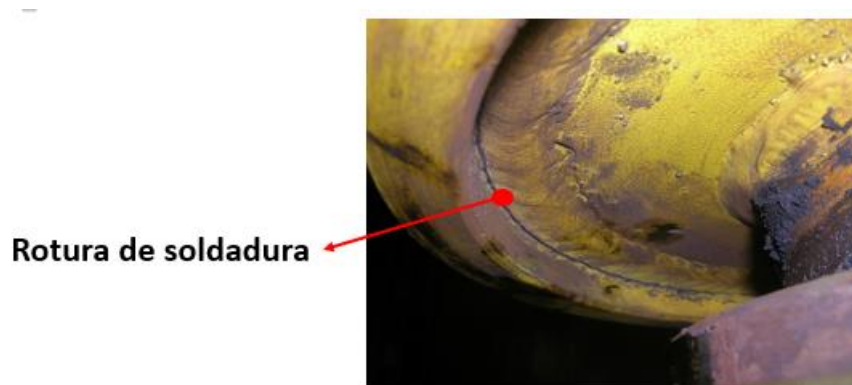


Figura 7. Rotura soldadura tambor

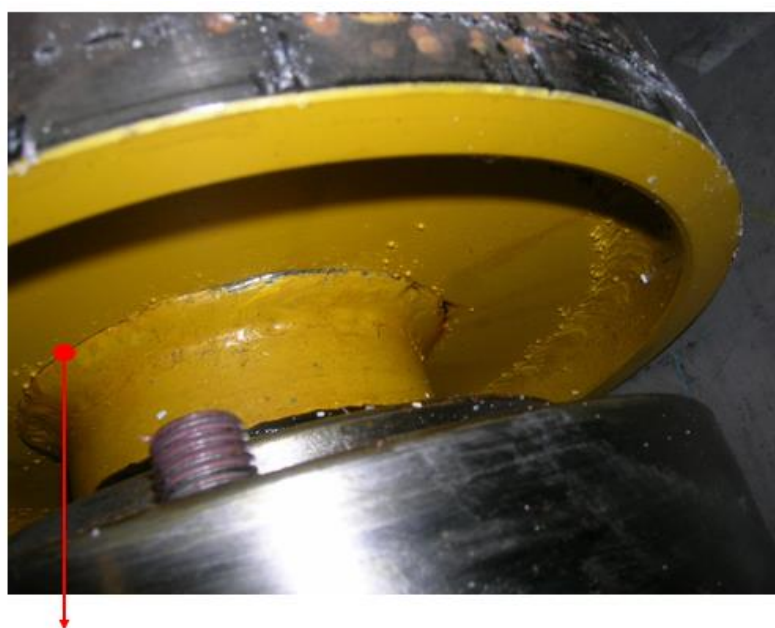


Figura 8. Rotura soldadura tambor

- Problema de ajuste entre pinza y rodamiento en el lado motriz. El motor no puede mover al tambor a causa de un mal acoplamiento:

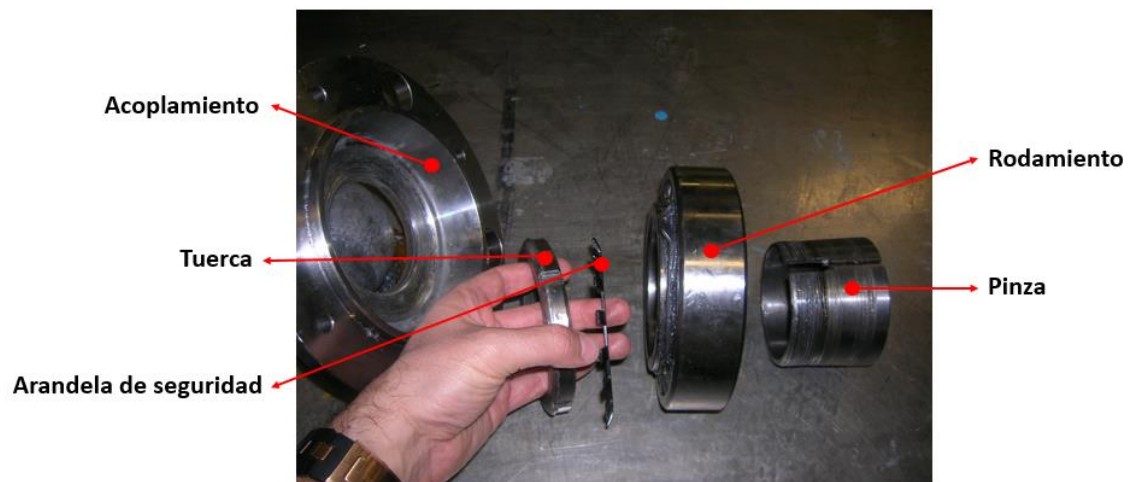


Figura 9. Unión eje-acoplamiento.

- Pinza suelta y rota diametralmente:



Figura10. Pinza

- Problema ensamblaje rodamiento-acoplamiento:

El elevador 1 lleva instalado desde agosto del 2018 por lo tanto no hay histórico de fallos. En el caso del elevador viejo el fallo más repetido es la pinza suelta.

2.3.2. Plan de mantenimiento preventivo

El plan de mantenimiento preventivo se establece en función de los fallos típicos que se dan en este tipo de equipos y también en función de los que se observan a lo largo del tiempo y se van añadiendo tareas preventivas según las necesidades que aparecen.

A continuación, se presentan las tareas preventivas que más influyen en la prevención de daños causados por vibraciones.

Las siguientes tareas preventivas están clasificadas por la frecuencia con la que hay que realizarlas y dentro de esto por sistema mecánico:

- Cada cuatro semanas:
 - Sistema tracción- Acoplamiento
 - Comprobar el estado de desgaste del acoplamiento y verificar la existencia de partículas metálicas.
 - Comprobar si existe deslizamiento en el acoplamiento.
 - Verificar la existencia de ruidos extraños debidos a rozamientos o vibraciones.
 - Informar al mando del estado de los acoplamientos, indicando todas las irregularidades detectadas.
- Cada seis meses:
 - Sistema tracción-Tambor:
 - Verificar y engrasar las silletas de cojinetes de los rodamientos del eje tambor.
 - Sistema tracción- Acoplamiento:
 - Realizar el engrase del acoplamiento dentado.
 - Verificar el correcto apriete de los prisioneros y tornillos de la pinza (brida loca).
 - Verificar la correcta fijación de la chapa y el acoplamiento.

- Sistema tracción- Acoplamiento de reserva:
 - Verificar la correcta fijación de la chapa y el acoplamiento.
- Sistema tracción- Rodamientos:
 - Soltar las tapas de los dos rodamientos del tambor y verificar en su interior el estado de la pinza y el correcto estado de engrase.
 - Verificar el correcto apriete del prisionero de la pinza o el estado de la pestaña de la arandela de seguridad dependiendo del tipo de rodamiento.
- Cada doce meses:
 - Sistema tracción-Motor- reductor:
 - Comprobar la correcta sujeción. Comprobar tornillos de amarre y reapretar si es necesario.
 - Comprobar la correcta actuación del freno.
 - Comprobar el nivel de aceite de la reductora.
 - Comprobar estanqueidad de aceite de la reductora.
 - Comprobar la existencia de ruidos extraños.
 - Anualmente en periodo de no producción:
 - Sistema tracción- Acoplamiento:
 - Realizar el intercambio del motor- reductor por el de reserva y comprobar su correcto funcionamiento.
 - En el acoplamiento que se ha soltado, abrirlo, verificar su estado, limpiar y engrasar, cerrar acoplamiento y dejarlo de reserva.

La realización de estas tareas permite prevenir en la medida de lo posible los fallos en estos equipos.

Para consultar el resto de las tareas del plan de mantenimiento, véase [ANEXO A. PLAN DE MANTENIMIENTO.](#)

3. VIBRACIONES EN EL ÁMBITO DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

3.1. Concepto de vibración

Se denomina vibración o movimiento vibratorio a la variación del movimiento o posición de un sistema mecánico, con relación al tiempo y respecto a una posición de equilibrio estable. Su característica fundamental es que es periódico, siendo frecuente el movimiento armónico simple, por lo que tiene gran importancia en los estudios vibratorios.

Los sistemas mecánicos son sometidos a la acción de varias fuerzas normalmente periódicas a lo largo del tiempo, y por este motivo responden variando sus estados de equilibrio y su funcionamiento normal. Aunque en mantenimiento predictivo interesa conocer las fuerzas que aparecen sobre los elementos de las máquinas (por ejemplo, rodamientos), estas fuerzas se medirán de manera indirecta a través del movimiento (vibración) que causan.

Por otro lado, la vibración es una oscilación puesto que una parte de un cuerpo oscila con respecto a otra, o el cuerpo en su conjunto oscila con respecto a una posición de referencia.

3.2. Instrumentos de medida de vibraciones

En todo equipo de medida y análisis de vibraciones hay dos partes esenciales: el sensor o transductor y el instrumento de medición propiamente dicho. Todos los instrumentos de vibraciones tienen al menos un sensor y dependiendo del tipo de máquina pueden ser necesarios distintos sensores para distintas aplicaciones.

3.2.1. Sensores

El sensor es un instrumento que tiene una propiedad sensible a una magnitud del medio, y al variar esta magnitud el sensor manifiesta la presencia de dicha magnitud y su medida. En análisis de vibraciones los sensores más empleados son:

1. Sondas de desplazamiento:

Se trata de unos sensores capaces de medir la vibración relativa del eje. Para ello se emplean sensores de proximidad, basados en el fenómeno de las corrientes inducidas. Estos sensores generan una señal eléctrica de alta frecuencia que induce otras corrientes en el eje al que apunta el sensor. La intensidad de esta corriente inducida es proporcional a la distancia entre el sensor y el eje, midiéndose de esta manera el desplazamiento vibratorio.

Este tipo de sensores solo se pueden utilizar en monitorizado en continuo, para máquinas con cojinetes de aceite, no pudiendo montarse en rodamientos ni en equipos de alta frecuencia.

2. Sensores de velocidad electrodinámicos:

Se trata de sensores que funcionan basándose en el principio de inducción electromagnética. La bobina está suspendida elásticamente en el cuerpo del sensor y permanece inmóvil cuando el cuerpo del sensor junto con el imán vibra en contacto con el sistema que se mide. El movimiento relativo provoca la inducción de una corriente alterna proporcional a la velocidad relativa entre la bobina y el imán. La señal de salida no necesita ser amplificada previamente.

Este tipo de sensores no es fiable en altas frecuencias ni frente a variaciones de temperatura. No son aptos para máquinas pequeñas ni para medir aceleración.

3. Acelerómetros piezoeléctricos:

Es el tipo de sensor más empleado actualmente tanto para aparatos portátiles como para sistema de monitorizado en continuo. Su funcionamiento está condicionado por el efecto piezoeléctrico de un cristal. Esto hace que el cristal al estar sometido a una fuerza de compresión genere una corriente eléctrica proporcional a esa fuerza. Las fuerzas son proporcionales a la aceleración. La corriente eléctrica generada es muy pequeña y necesita una amplificación previa.

Este tipo de sensores tiene muchas ventajas como su pequeño tamaño y poco peso, medidas fiables de desplazamiento, velocidad y aceleración, calibración muy estable en el tiempo y amplio rango frecuencial.

En este proyecto se emplean los acelerómetros Duo Tech, para medir vibraciones e impulsos de choque, combinando distintas técnicas (véanse capítulos 3. *Método SPM HD* y 4. *Método HD ENV*) con la finalidad de controlar el estado de los rodamientos y su lubricación. Las características técnicas que presentan estos acelerómetros son las siguientes:

Rango frecuencias	<ul style="list-style-type: none">• Eje Z: 2 a 10000 Hz• Ejes X e Y: 2 a 7000 Hz
Sensibilidad	100 mV/g
Rango temperaturas	-50 a 120 °C

Tabla 3. Características acelerómetro Duo Tech.

3.2.2. Colocación de sensores

La colocación y el método de sujeción de los sensores de contacto (acelerómetros y velocímetros) determinan directamente la respuesta en altas frecuencias.

La mejor sujeción del sensor es atornillarlo directamente en la superficie de la máquina, o a una pieza metálica intermedia para que haga contacto directo.

La sujeción magnética también es eficaz, pero depende del estado de la superficie en la que se coloca el imán. Esta debe ser lisa, limpia y sin restos de grasa o pintura para que las medidas sean correctas.

En este proyecto ha sido necesario recurrir a otro método de sujeción debido a la dificultad para atornillar los sensores en puntos que garanticen unas buenas mediciones. Por este motivo se ha empleado un adhesivo específico que proporciona una perfecta unión entre el transductor y cada elemento que se desea controlar. El hecho de que se emplee un adhesivo no impide que la medición se realice de forma correcta y precisa y se consiga un resultado satisfactorio. Se recomienda aplicar una capa fina de adhesivo para evitar una amortiguación no deseada de las vibraciones e impactos, como consecuencia de la flexibilidad de la capa de adhesivo. Este adhesivo ha sido previamente analizado en el laboratorio de la planta para asegurar que sus componentes no son nocivos.

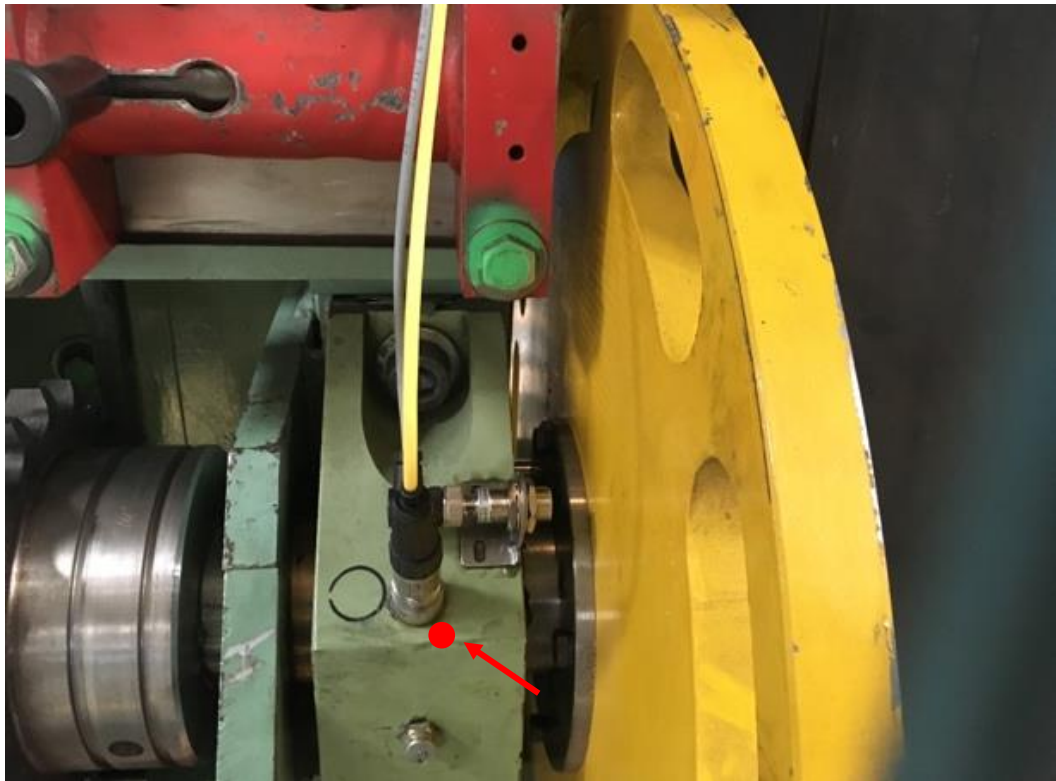


Figura 11. Acelerómetro Duo Tech en silleta.



Figura 12. Acelerómetro Duo Tech reductora.

Los puntos de medida y la orientación de los sensores son aspectos muy importantes a tener en cuenta a la hora de medir vibraciones.

Es deseable colocar el sensor lo más cerca posible del rodamiento y sobre metal sólido, evitando colocarlo en tapas de rodamientos que conducen poco la energía de vibración. También se deben evitar las carcasas de ventiladores y las aletas de refrigeración de los motores.

Para motores de menos de 50 CV es suficiente con un único punto de medida, pero para motores con más de 50 CV, cada rodamiento debería tener su propio punto de medida.

Para poder establecer una tendencia de vibración en el tiempo es necesario que los datos estén tomados de la misma manera cada vez que se hace la medición. Por esta razón, se recomienda el uso de transductores atornillados a la superficie de la máquina.

Se deben obtener datos de vibración de cada punto de medición en las tres direcciones: axial (dirección paralela al eje), radial (dirección vertical en máquinas horizontales) y tangencial (dirección horizontal perpendicular al eje).

3.2.3. Aparatos de medida de vibraciones

Los aparatos de medida de vibraciones se pueden clasificar según el tipo de uso y según su capacidad de análisis.

Por el tipo de uso:

1. Equipos portátiles:

Se emplean para realizar medidas periódicas en varias máquinas a lo largo de la planta. El sensor se va moviendo por los distintos puntos de medida y recoge los valores de vibración. El análisis se realiza posteriormente comparándose las tendencias de vibración.

2. Monitorizado en continuo:

Se trata de unos dispositivos fijos con sensores instalados en los puntos de medición. Principalmente se controlan parámetros de vibración, pero se pueden vigilar más variables. Este método se suele emplear para equipos críticos.

El sistema, empleado en este proyecto es un sistema de monitorizado en continuo conectado a un software de supervisión que permite almacenar los datos y generar espectros para el posterior análisis.

Por su capacidad de análisis:

1. Vibrómetros:

Son equipos que solamente pueden medir valores globales de vibración. Disponen también de parámetros especiales para la detección de problemas incipientes en rodamientos. Sus capacidades de análisis son limitadas, pero se emplean por su bajo coste.

2. Analizadores de frecuencia:

Los analizadores de frecuencia son capaces de medir el espectro de vibraciones, además del valor global o de la onda temporal. Los más comunes son los digitales que calculan el espectro utilizando un algoritmo matemático conocido como transformada rápida de Fourier (FFT).

Por lo tanto, para realizar un mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones es necesario disponer de un equipo que permita realizar espectros.

3.3. Causas de fallo en máquinas rotativas.

Los fallos más habituales en estos equipos son los siguientes (Pintor Borobia, s.f.; Prieto, 2017)

- Desequilibrio.
- Excentricidad.
- Eje doblado.
- Desalineación.
- Holguras.
- Rodamientos.
- Desgaste mecánico.

3.3.1. Desequilibrio.

El desequilibrio es un suceso que se da en todas las máquinas rotativas. Se dice que un elemento se encuentra desequilibrado cuando su centro de gravedad

no coincide con su centro de rotación. Es decir, la distribución de masas en el eje no es uniforme y está desplazada con respecto de su eje de giro. El origen del desequilibrio se puede deber a:

- Montajes inadecuados
- Acumulación de material
- Desgastes
- Piezas rotas o sueltas

Las características de la vibración causada por el desequilibrio son:

- En la onda temporal se puede observar una vibración sinusoidal a 1xRPM.
- La onda temporal es periódica, simple y sin impactos.
- La amplitud de los armónicos es muy baja.

Si la vibración debida al desequilibrio supera los límites permitidos, se debe equilibrar. Equilibrar consiste en quitar o añadir masa a un rotor hasta que la vibración disminuya su valor. Para que no se produzca el desequilibrio el rotor debe tener una forma geométrica, simétrica y una distribución de masa uniforme, aunque eso es difícil que se dé por distintos motivos como falta de homogeneidad en materiales, especialmente en fundiciones donde se dan burbujas de aire, errores de maquinado y tolerancias en el proceso de manufactura, cambio de componentes del rotor durante operaciones de mantenimiento o desgaste irregular durante operaciones de la máquina, depósitos de material acumulados durante la operación de la máquina y distorsión del rotor debida a gradientes de temperatura.

Para detectarse el desequilibrado deben realizarse medidas de vibración en las direcciones radiales y en la dirección axial. La lectura axial ayuda a diferenciar entre un desequilibrio y una desalineación, ya que en el desequilibrio la lectura axial es inferior a las demás mediciones radiales. Cuando se analizan motores en voladizo, la flexión producida en el eje hace que la vibración en la dirección axial sea también un valor elevado a la velocidad de giro. La máxima vibración originada por un desequilibrio se localiza normalmente en la dirección radial,

desplazada 90° con respecto a la sujeción del rodamiento. (Girar 90° con respecto a la sujeción del rodamiento en el plano radial).

Por lo tanto, una vibración causada únicamente por desequilibrio ocurrirá a la frecuencia fundamental de 1xRPM en la dirección radial y con armónicos de la velocidad de giro de baja amplitud.

3.3.2. *Excentricidad.*

Se produce cuando el centro de rotación del eje no coincide con el centro geométrico del rotor. Se puede dar con mayor frecuencia en poleas a causa del desgaste del diámetro primitivo o si el diámetro exterior no es concéntrico con el diámetro primitivo.

Supone un peso mayor en uno de los lados del rotor, su vibración aparecerá a 1x RPM en la dirección radial, por lo que se diagnostica como desequilibrio. La excentricidad se detecta con picos de 1x RPM en la dirección radial que varían con la carga. Además, suele ser muy direccional, en función del desgaste de la polea o del eje. En la excentricidad la diferencia de vibración entre la dirección vertical y horizontal es muy alta, sin embargo, en el desequilibrio los valores son similares.

3.3.3. *Eje doblado.*

En un ensamble del rotor horizontal, el eje presenta un cierto grado de flexión, debido a su propio peso o condiciones térmicas. Si un eje está deformado se puede confundir con el desequilibrio debido a que presenta un pico a 1xRPM en dirección radial, pero este hecho se desmiente al observar que los valores de vibración en dirección axial serán elevados al contrario de lo que ocurre en el desequilibrio y la excentricidad. Sin embargo, también se pueden presentar amplitudes a 2xRPM.

Hay que tener en cuenta que los valores elevados de vibración en la dirección axial se pueden deber a otras causas distintas al eje doblado como podría ser: desalineación del acoplamiento, desalineación de rodamientos o desequilibrio en un eje en voladizo. (Para determinar el problema se realiza un análisis de fase de vibración en la dirección axial)

3.3.4. Desalineación.

Se trata de un problema muy común en máquinas rotativas debido a la dificultad de alinear ejes y sus respectivos apoyos, a pesar del uso de rodamientos autolineables y acoplamientos elásticos. Se produce cuando dos ejes conectados mediante un acoplamiento no se encuentran perfectamente alineados o colineales uno con respecto a otro. También se puede dar entre los cojinetes de un eje sólido o entre cualquier par de puntos de la máquina.

La desalineación de acoplamientos, rodamientos y poleas genera altas vibraciones en dirección axial y radial. Se pueden dar picos de 1xRPM, 2xRPM o 3xRPM.

Entre las causas de la desalineación se encuentran las siguientes:

- Ensamblado impreciso de los componentes.
- Alteración de la posición relativa de los componentes después del montaje.
- Distorsión debido a fuerzas en tuberías.
- Distorsión en soportes flexibles debido a un excesivo apriete.
- Expansión de la estructura de la máquina debido a un incremento de temperatura.
- El frente del acoplamiento no es perpendicular al eje.

Hay dos tipos diferentes de desalineación:

- Desalineación angular: Se produce cuando los ejes no están paralelos entre sí y forman un ángulo distinto de 180°. Se genera una elevada vibración en dirección axial con picos a 1xRPM o hasta 2xRPM.
- Desalineación paralela: Se produce cuando los ejes son paralelos entre sí y están desplazados el uno del otro. Se genera una elevada vibración en dirección radial con picos a 2x RPM.

La mayoría de los casos de desalineación es una combinación de los dos tipos anteriores.

3.3.5. Holguras.

Las holguras por sí solas no generan vibraciones solo en el caso de que existan otras fuerzas de excitación presentes como desequilibrio o desalineación. Si hay holguras, la excitación debida a pequeñas fuerzas puede causar altas vibraciones con picos a 1x RPM, 2xRPM, 3x RPM, medios armónicos y subarmónicos.

Las holguras pueden ser estructurales y rotativas. Las estructurales aparecen como consecuencia de un exceso de libertad de movimiento entre partes estáticas de la máquina, mientras que las rotativas aparecen en elementos giratorios de la máquina.

Las holguras pueden aparecer como consecuencia de los siguientes fallos mecánicos:

- Falta de apriete en elementos de unión: Se produce por el deterioro de la condición del ensamblaje de los elementos mecánicos que han superado las tolerancias de holgura o se han aflojado por el funcionamiento de la máquina.
- Grietas en fijaciones
- Juegos excesivos en rodamientos
- Problemas en los soportes de los rodamientos.

3.3.6. Rodamientos.

Los fallos en los rodamientos son una de las causas más comunes de avería en máquinas rotativas. En una fase inicial de deterioro, el incremento en el nivel global de la vibración es inapreciable e indetectable, lo cual supone un inconveniente a la hora de detectar precozmente los defectos, de ahí la necesidad de realizar un análisis en frecuencia (toma de espectros).

Los rodamientos están formados por varias partes bien diferenciadas y cada una presenta una vibración característica. Calculando las frecuencias asociadas a cada componente, se puede identificar qué parte del rodamiento está deteriorada. Estas partes son la pista interior, pista exterior, jaula y bolas o rodillos. Las frecuencias fundamentales de fallo de un rodamiento son:

- BPFO: Frecuencia de la pista exterior del rodamiento.
- BPFI: Frecuencia de la pista interior del rodamiento
- BSF: Frecuencia de bola.
- FTF: Frecuencia fundamental de jaula.

3.3.7. *Desgaste mecánico.*

Se produce cuando las partes que giran de una máquina entran en contacto con las partes estacionarias dando lugar a un efecto de fricción y provocando rozamientos. El roce se puede dar entre el eje y el metal antifricción de un cojinete o los rodillos, entre un elemento rodante y las pistas de rodadura, o en alguna parte del rotor rozando contra la carcasa. Cuando se produce el roce de un elemento rotativo, se generan picos de baja amplitud a 1xRPM, dando lugar casi seguro al fallo en la máquina. Por este motivo es muy importante emplear sistemas de monitorización capaces de captar frecuencias bajas y por tanto de detectar este defecto.

4. MÉTODO SPM HD

4.1. Introducción

El método de impulsos de choque (SPM) es una técnica que utiliza las señales de los rodamientos como base para un eficiente monitorizado de la condición de las máquinas. Desde su creación en 1969 por Eivind Sohoel, ha sido desarrollado, ampliado y aplicado durante más de 40 años, convirtiéndose en una filosofía aceptada a nivel mundial para el monitorizado de la condición de los rodamientos y el mantenimiento de la maquinaria. Se trata de un método apreciado por su facilidad de uso, así como su gran capacidad de detectar el deterioro de los rodamientos y su estado de lubricación.

De esta manera Shock Pulse Method High Definition (SPM HD) es una evolución patentada del método SPM, empleada para diagnosticar de manera rápida y fiable la condición de operación de los elementos rodantes.

4.2. Impulsos de choque

Los impulsos de choque (Sundström, 2010) son ondas elásticas que se propagan a través de materiales rígidos. Se crean a partir de la colisión entre objetos rígidos, como el acero. Como resultado, las moléculas en el punto de la colisión experimentan una aceleración que se transfiere desde las moléculas cercanas al punto de impacto hacia las moléculas próximas hasta crear una onda frontal. Si el material en el punto de colisión es lo suficientemente rígido y la colisión se produce durante un corto periodo de tiempo, se crea una onda elástica muy abrupta. Esta onda se propaga a través del material a la velocidad del sonido.

Estudiando el punto de contacto en un elemento rotativo de un rodamiento se observa que las ondas elásticas normalmente se producen en la superficie de contacto entre las pistas de rodadura y los elementos rotativos y contienen una energía superior a 40 kHz. Esta propiedad de una onda elástica típica en un material rígido es muy importante para entender el transductor del impulso de choque, explicado en el siguiente apartado.

Estudiando la interacción entre los elementos rotativos y las pistas de rodadura, se puede observar que se generan muchos impulsos de choque incluso en los rodamientos sanos. Estos impulsos de choque originados por pequeñas colisiones ocurren a un nivel microscópico en todos los elementos rotativos. En un rodamiento sano y bien lubricado solamente las asperezas de la capa más externa van a entrar en contacto, penetrando la película de aceite, y creando por tanto impulsos de choque de baja amplitud, mientras que en un rodamiento mal lubricado la amplitud y el ritmo de repetición serán más altos. En un rodamiento con daños en la pista de rodadura o en los elementos rotativos, se van a generar muy altas amplitudes de impulsos de choque con un ritmo de repetición que depende de la geometría del rodamiento y de las RPM del eje.

La fuerza de los impulsos de choque generados por los impactos es proporcional a la velocidad relativa de los elementos de colisión.

4.3. El transductor del impulso de choque

El transductor SPM (Sundström, 2010) está diseñado para trabajar a una frecuencia de resonancia de 32 kHz. Esto significa que si el transductor está expuesto a una señal mecánica que contiene energía a 32 kHz va a alcanzar el grado máximo de oscilación y responderá con un comportamiento sonoro.

Estudiando los impulsos de choque de baja amplitud se observa que contienen diferentes frecuencias, especialmente contienen componentes de frecuencia de 32 kHz. Por lo tanto, si un transductor está expuesto a un impulso de choque, va a ser muy receptivo a una frecuencia de 32 kHz y responderá con un comportamiento sonoro. Este comportamiento es transferido a una cerámica piezoeléctrica que permitirá medir el sonido en el transductor.

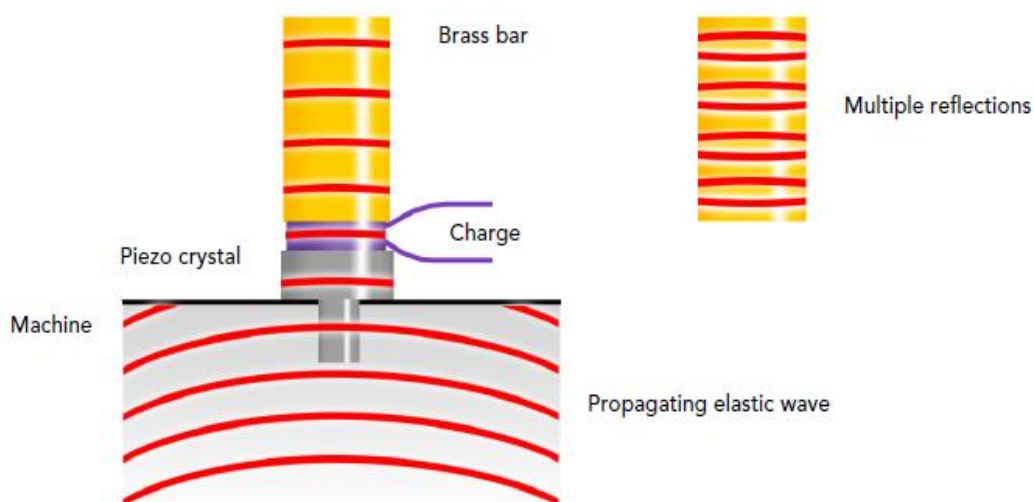


Figura 13. Comportamiento del transductor del impulso de choque. (Fuente: Sundström, 2010).

La onda frontal del impulso de choque golpea el transductor, alcanza su interior, atraviesa la cerámica piezoeléctrica y viaja a través de la barra de latón. Cuando alcanza el extremo de la barra de latón es reflejada de nuevo y se vuelve a reflejar sucesivas veces hasta que se detiene tras un corto periodo de tiempo. Esta reflexión crea una onda permanente en el interior de la barra de latón a una frecuencia de 32 kHz.

Una propiedad importante del transductor es el tiempo de parada del comportamiento sonoro. Cuando el transductor es golpeado por la propagación del impulso de choque, comienza a resonar a 32 kHz. La primera oscilación comienza a una alta amplitud y las siguientes con una amplitud que va disminuyendo gradualmente. Si el transductor es golpeado con otro impulso de choque antes de que la primera oscilación “muera”, el siguiente impulso se va a superponer al primero creando falsas amplitudes. Es esencial que el sonido “muera” lo más rápido posible. Esto puede ser un problema con la técnica de la envolvente de la vibración donde normalmente el tiempo del sonido para un acelerómetro es más prolongado. El transductor está diseñado teniendo en cuenta este hecho.

La barra de latón del interior del transductor tiene su propia masa, presionando de nuevo a la cerámica piezoeléctrica, creando señales cuando está expuesto a vibraciones de baja frecuencia. Midiendo directamente sobre el cristal (cerámica piezoeléctrica) mostrará una combinación del comportamiento sonoro con señales de baja frecuencia provenientes del desequilibrado, etc. Para eliminar la influencia de señales de baja frecuencia, se emplea un filtro de paso banda en combinación con el transductor. De esta manera se eliminan las señales de baja frecuencia no deseadas.

4.4. Normalización de la amplitud del impulso de choque

Como se ha comentado antes, la amplitud del impulso de choque es proporcional a la velocidad relativa de colisión de los objetos. En el caso de un rodamiento, la velocidad de los elementos rotativos con respecto a la pista de rodadura viene definida por el diámetro y la velocidad de rotación del eje. La relación entre la amplitud del impulso de choque y la velocidad relativa de los elementos en el momento del impacto crea problemas a la hora de establecer los niveles de alarma. Un cambio en la velocidad de rotación del eje de un rodamiento afectará a la amplitud del impulso de choque significativamente e incluso hará imposible la fijación de un nivel de alarma.

Una manera de solucionar este problema es introducir un factor de normalización que normalice la amplitud del impulso de choque a pesar de la velocidad relativa del elemento rotativo con respecto a la pista de rodadura. Como resultado el impulso de choque se presenta en una escala normalizada. Definiendo el diámetro del rodamiento y las RPM, el sistema puede calcular un factor normalizado llamado dBi para diferentes diámetros y RPM.

Por ejemplo, un valor alto de amplitud del impulso de choque en un rodamiento sano puede ser normal si el diámetro es grande y las RPM altas. En estos casos los elementos rotativos golpean asperezas sobre una pequeña superficie y como la velocidad es alta el impulso de choque resultante es más fuerte. El factor normalizado resultante va a ser alto y cuando este factor es sustraído de medidas de valor alto, la diferencia será un valor bajo indicando un engranaje sano.

4.5. SPM HD

SPM HD está basado en los mismos fundamentos físicos que el método SPM y se utiliza el mismo tipo de transductor. Se han mejorado la interfaz y el proceso de adquisición de datos, obteniendo resultados más claros sobre todo en aplicaciones con bajas RPM.

Las entradas necesarias para este método son las RPM y los datos del rodamiento:

- **RPM:** Para poder calcular el factor de normalización es necesario conocer las RPM. Si la velocidad es constante se introducen manualmente y si la velocidad varía se emplea un sensor que detecte las RPM.
- **Datos del rodamiento:** Se necesita el diámetro del eje y las características de los rodamientos.

Las salidas que entrega el sistema SPM HD son HDm, HDc y espectros:

- **HDm:** El valor HDm es un valor escalar expresado en decibelios (dB). Representa la mayor amplitud del impulso de choque encontrada durante el tiempo de medición. Se emplea para detectar fallos mecánicos del rodamiento.
- **HDc:** El valor HDc es un valor escalar expresado en dB. Representa el estado de lubricación del rodamiento. Este parámetro toma valores más bajos cuando las amplitudes de los impulsos de choque son también bajas, es decir, cuando los rodamientos están bien lubricados. En condiciones de operación con una lubricación deficiente, aumentan los impulsos de choque y, por tanto, esto resulta en valores de HDc más elevados.

El tiempo total de medición se divide en periodos de 5ms. En cada uno de estos periodos se identifica el valor más alto del impulso de choque y se almacena temporalmente. Tal y como se muestra en la siguiente figura, el valor de HDc será el más bajo de estos valores almacenados.

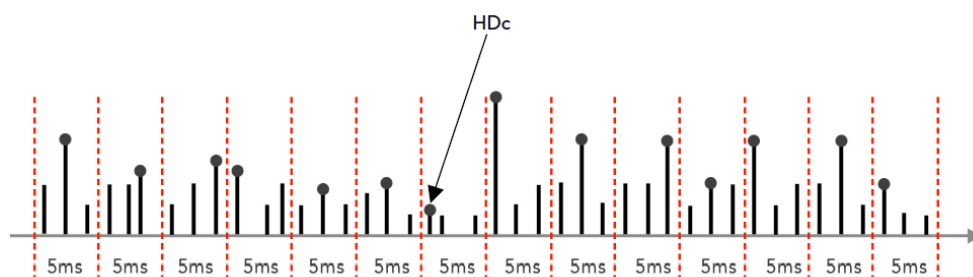


Figura 14. Obtención del valor de HDc (Fuente: Sundström, 2010).

- **SPM Time signal HD:** El principal objetivo de este parámetro es identificar el origen de los impulsos de choque. En la mayoría de los casos se suele utilizar más que el SPM Spectrum HD porque es más fácil interpretar los resultados. Puede tomar valores desde 1 a 1000000. Se representa en una escala lineal.
- **SPM Spectrum HD.** Este valor aparece cuando se aplica una FFT sobre SPM HD Time Signal. Resulta un parámetro muy útil en la identificación de espectros. Al igual que en el caso anterior, se representa mediante una escala lineal.



Figura 15. Entradas y salidas SPM HD (Fuente: Sundström, 2010).

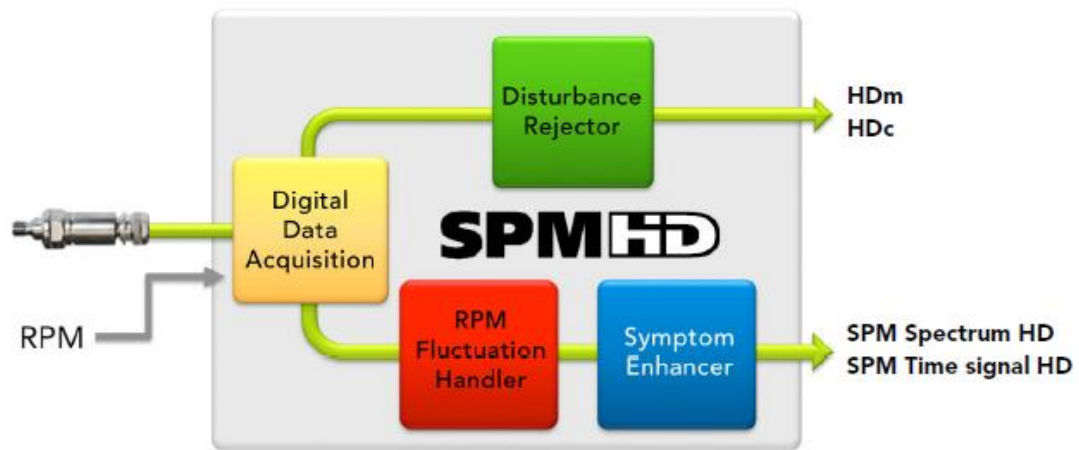


Figura 16. Pasos metodología SPM HD. (Fuente: Sundström, 2010).

5. MÉTODO HD ENV

5.1. Introducción

El método de la envolvente de la vibración de alta definición (HD ENV) es un nuevo enfoque que responde a la tarea de detectar daños en rodamientos y engranajes en un estadio inicial. Combinando un diseño de hardware de bajo ruido con algoritmos que procesan señales digitales y el transductor (acelerómetro), es posible extraer información relevante de rodamientos y engranajes de un entorno ruidoso, con mucha claridad.

Cuando se introdujo este método hace varios años, se pudo detectar los fallos en estadios más iniciales, incluso con elementos trabajando a baja frecuencia.

Esta tecnología se introdujo por primera vez en 2010. Uno de sus objetivos fue detectar daños en rodamientos y engranajes trabajando a baja o muy baja velocidad (incluso desde 1 a 60 RPM). En junio de 2015 se introdujo la técnica HD ENV en el mercado global.

5.2. Principios físicos básicos

Cuando dos elementos mecánicos chocan, por ejemplo, los rodillos de un rodamiento con la pista de rodadura, o cuando la fricción se debe a que las piezas metálicas están sometidas a determinadas fuerzas, se generan ondas elásticas. En el acero estas ondas se propagan a 6,1 m/s. En otros materiales más blandos como el latón, las ondas tienen una velocidad más baja de 3,475 m/s, y en materiales más duros las ondas tienen una velocidad más alta de 12 m/s. Estas ondas elásticas normalmente tienen un nivel de energía muy bajo en comparación con las señales de baja frecuencia originadas a causa del desequilibrio, desalineación, problemas con las correas y acoplamiento.

Una señal de vibración de baja frecuencia es un movimiento de masa unidireccional, mientras que las ondas elásticas se propagan en un área más extensa formando ondas, como se puede observar en la siguiente imagen:

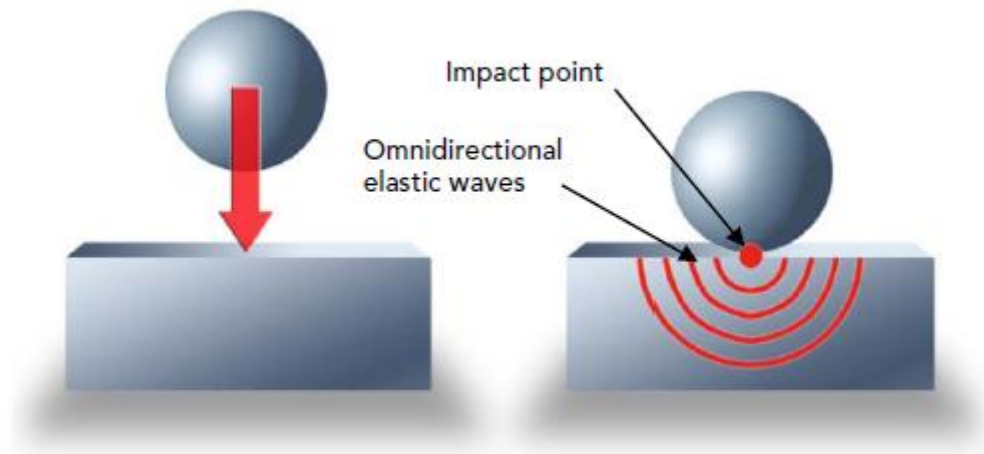


Figura 17. Propagación ondas elásticas causado por impacto. (Fuente: Sundström, 2015).

En el comportamiento real de las máquinas, tanto las señales de baja frecuencia como las ondas elásticas ocurren de forma combinada.

El objetivo con la envolvente de la vibración es extraer las ondas elásticas más débiles de las señales de vibración más fuertes.

5.3. Los cuatro estadios de rotura de un rodamiento

Es común describir el proceso de rotura de un rodamiento en cuatro etapas desde el primer indicio microscópico hasta un fallo más severo.

Este proceso comienza lentamente. El tiempo que transcurre entre los estadios 1 (inicio de la rotura) y 2 (propagación de la rotura) es relativamente largo en comparación con el transcurrido entre los estadios 3 (pérdida de material) y 4 (fragmentación) puesto que la velocidad de daño aumenta en los últimos estadios.

La presión en la línea de contacto entre los elementos de rotación y la pista de rodadura externa o interna es muy alta. Los rodamientos están diseñados para soportar estas presiones, pero puede haber imperfecciones superficiales, como roturas microscópicas, las cuales al ser presionadas se pueden ensanchar. Cuando los elementos de rotación entran en contacto con las fisuras, estos ejercen una fuerza pulsátil y la fricción entre las partes metálicas emite ondas elásticas. En este momento se originan los estadios 1 y 2.

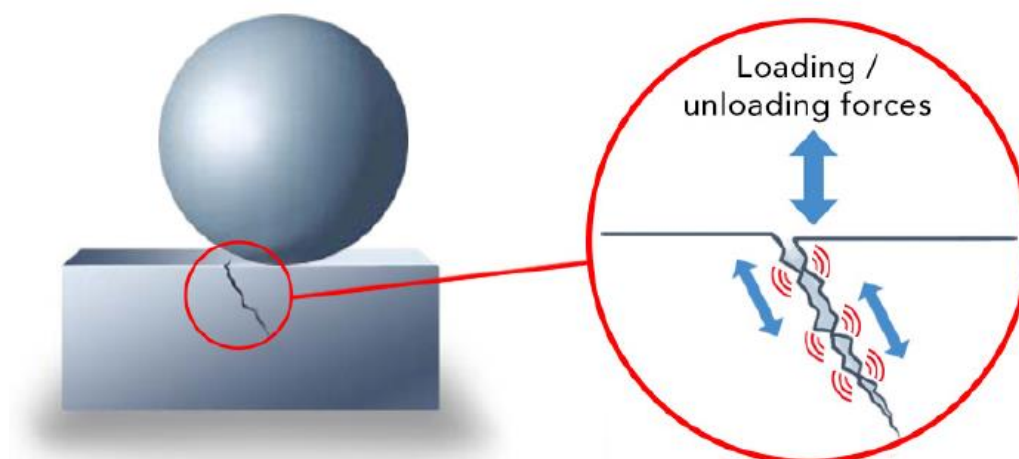


Figura 18. Comportamiento típico de rotura estadios 1 y 2. (Fuente: Sundström, 2010).

En los estadios 3 y 4 hay más colisiones entre los elementos de rotación y las esquinas de las partes sueltas. En el estadio 4 se dejan de generar ondas elásticas.

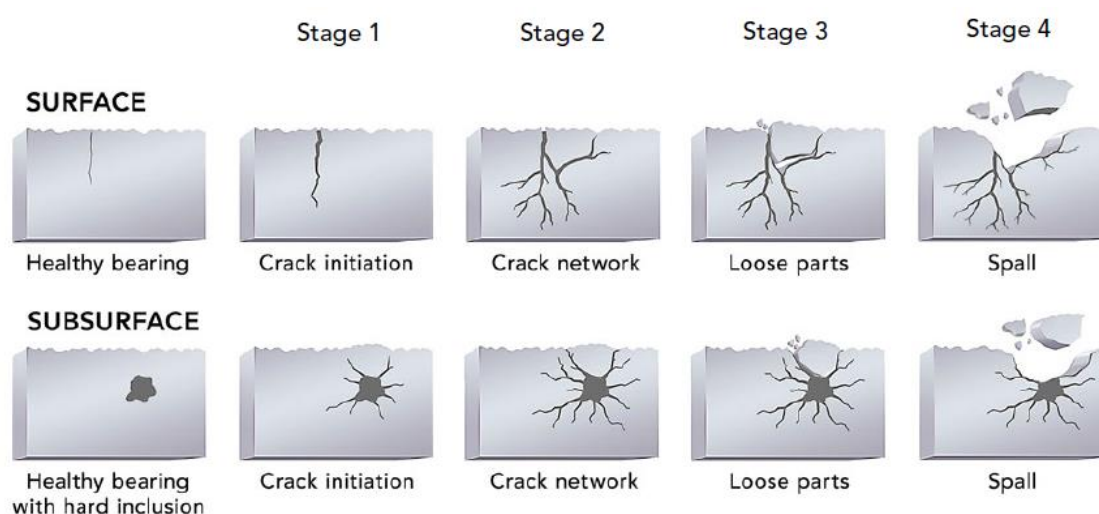


Figura 19. Estadios de rotura de un rodamiento. (Fuente: Sundström, 2010).

5.4. Pasos seguidos en la metodología HD ENV

La metodología HD ENV emplea la señal transmitida por un acelerómetro para generar tres resultados que provienen del mismo conjunto de datos. A continuación, se muestra el proceso de tratamiento de la señal desde que se

realiza la medición por parte del transductor hasta la obtención de los resultados finales:

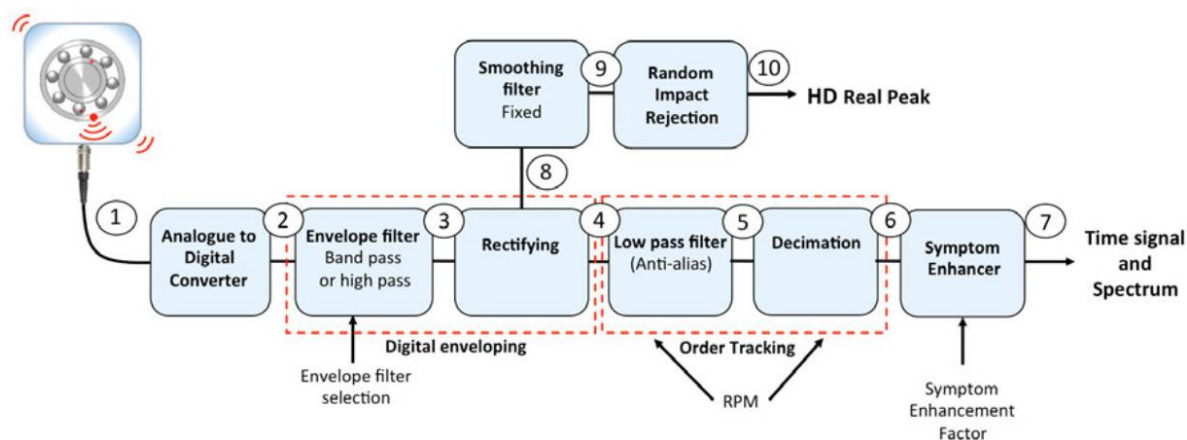


Figura 20. Pasos metodología HD ENV. (Fuente: Sundström, 2010).

Tal y como se puede apreciar en el esquema, el acelerómetro detecta vibraciones e impactos en el elemento estudiado (rodamiento) generándose una señal analógica de baja frecuencia que se transforma en una señal digital a través de un conversor analógico-digital (ADC) de 24 bit. A partir de aquí, en la segunda etapa se eliminan las señales de baja frecuencia, manteniéndose por tanto las de alta frecuencia. En una tercera etapa, se rectifica la señal transformando las partes negativas en positivas. Y, finalmente, antes de obtener la señal totalmente procesada, se aplica un filtro paso bajo, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

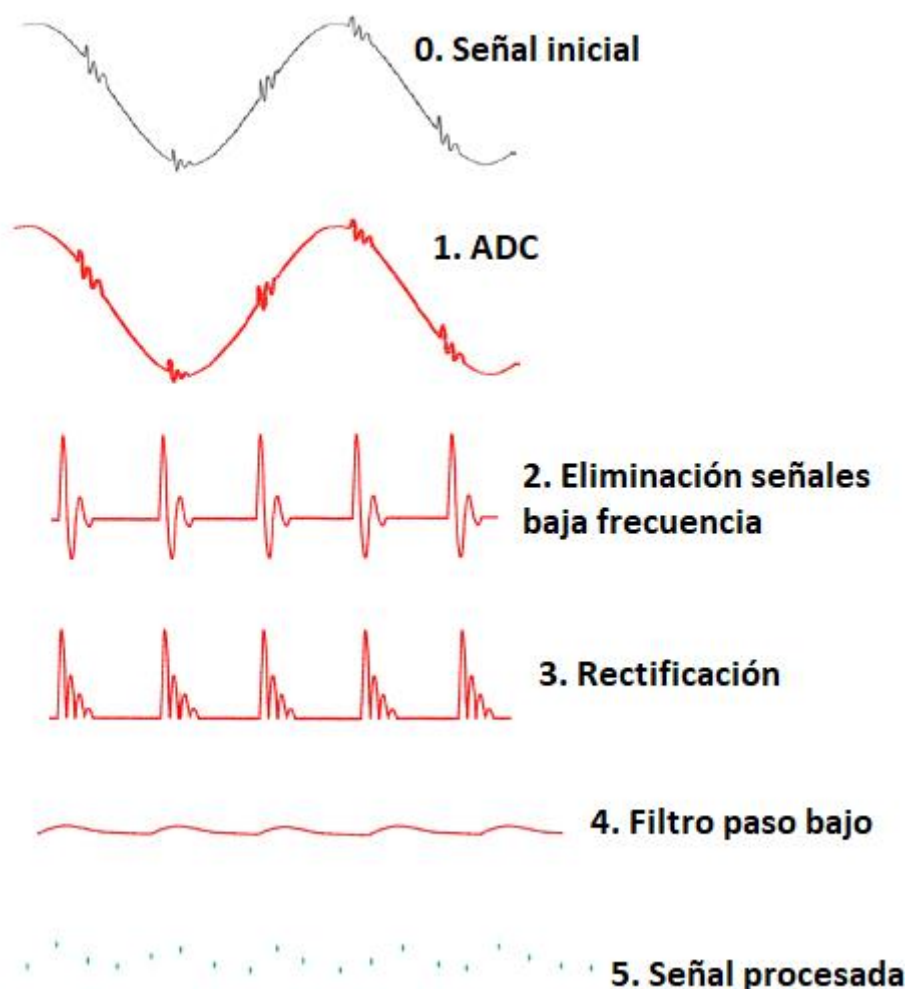


Figura 21. Procesamiento de la señal metodología HD ENV.

Una vez procesada la señal, se obtienen los siguientes resultados:

- **HD Real Peak:** Es el parámetro básico de tratamiento de la tendencia de la señal y las alarmas. Para medirlo se emplea una escala logarítmica y su valor es expresado en dB. Se pueden encontrar picos hasta por encima de 60 dB.
- **HD ENV Time signal:** Se emplea para identificar el origen de las ondas elásticas.
- **HD ENV Spectrum:** Este valor aparece cuando se aplica una FFT sobre HD ENV Time Signal. Es muy útil para identificar el origen de las ondas elásticas.

6. IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE VIBRACIONES E IMPULSOS DE CHOQUE.

Como propuesta de mejora se pretende implementar un sistema que permita el estudio de las vibraciones y los impulsos de choque para detectar el fallo de forma precisa y precoz. Para ello, se ha acudido a los servicios de una empresa que ha prestado sus conocimientos y tecnología con anterioridad en el Departamento de Montaje Final, donde se ha instalado el sistema y se ha realizado un proceso de vigilancia y diagnóstico de la maquinaria industrial mediante el análisis de las vibraciones y los impulsos de choque, con un resultado satisfactorio.

La empresa antes mencionada, Control No Destructivo, S.L. (CND), acumula más de 60 años de experiencia en la fabricación y suministro de instrumentación para la realización de ensayos no destructivos en el sector industrial. Ofrece varias líneas de productos como análisis de vibraciones, endoscopia, ultrasonidos, corrientes inducidas, rayos X y analizadores de aleaciones.

En este estudio interesa el análisis de vibraciones e impulsos de choque para la detección temprana de una amplia variedad de condiciones de fallo tales como desequilibrio, desalineación, resonancia, holgura, fallo de engranaje o rodamiento en maquinaria rotativa.

Intellinova es un sistema de monitoreo en continuo, empleado para mejorar el funcionamiento de los equipos, maximizando el nivel de disponibilidad y desarrollo de la planta.

Se trata de un sistema de alta resolución, de gran precisión y fiabilidad, que combina técnicas de medición complejas y procesos de datos avanzados con gran variedad de opciones para la personalización del sistema.

Mediante su tecnología permite monitorizar de 8 a 32 canales de vibración o control del estado de los rodamientos, con la tecnología patentada SPM HD. Incluye también diversos canales para entradas y salidas analógicas y trabaja con la plataforma Condmaster³.

³ Condmaster Ruby 2019 es un software completo de análisis, diagnóstico y solución de problemas que se comunica con todos los instrumentos portátiles SPM y sistemas en línea compatibles con Ethernet para el monitoreo continuo.

Los dispositivos de medición son unos sensores colocados en dirección vertical, horizontal y axial, en los puntos más críticos, que toman los datos con la frecuencia preestablecida. Estos datos son enviados a través del gestor de comunicación CES (Condmaster Entity Server), al Condmaster donde se pueden visualizar las tendencias, espectros, ondas temporales y todos los parámetros de estado en directo, como la severidad del daño de un rodamiento o la condición de lubricación, para todos los dispositivos conectados. El software también permite exportar la información al programa Excel y realizar un análisis de datos para conseguir tendencias de comportamiento y sacar conclusiones que apoyen en la toma de decisiones.

En este caso concretamente se ha instalado el sistema Intellinova Parallel EN, que mide en continuo y de forma sincronizada hasta 16 canales por unidad, siendo muy útil en aplicaciones con ciclos de tiempo reducido y bajas revoluciones (incluso debajo de 0,1 rpm). Estos canales miden en paralelo vibración y/o impulsos de choque con el acelerómetro Duo Tech.

El acelerómetro Duo Tech es un transductor que se emplea para medir vibraciones e impulsos de choque, empleando una sola unidad. Combina las técnicas HD ENV Y SPM HD, con la finalidad de ofrecer un control completo del estado de los rodamientos y su lubricación, para detectar el deterioro y los problemas que surgen a causa de las vibraciones.

Este sistema se puede emplear como método de protección puesto que permite ser configurado en modo alerta en tiempo real y parada de maquinaria mediante conexión a relay. Mediante el software Condmaster Ruby y el gestor de comunicación CES, se puede ver en tiempo real que canal se encuentra en medición, cuáles serán los siguientes y como afectan los cambios que se ejecutan en el sistema. Permite visualizar tendencias, espectros, ondas temporales y todos los parámetros de estado en directo y para todos los dispositivos conectados.

Este sistema implementa las tecnologías SPM HD y HD ENV mediante sensores que realizan las siguientes mediciones:

- Inductivo: mide velocidad.
- SPM HD: mide impacto (dB)
 - HDc-lubricación
 - HDm-estado del elemento mecánico
- Vibración
 - HD ENV: HDrp (envolvente de la vibración)
 - Vibraciones (mm/s^2)

Como se ha comentado anteriormente, se ha empleado una unidad Intellinova que mide 16 canales. Para ello, se han colocado 16 sensores, 8 en cada elevador, en los puntos más críticos y un sensor inductivo en cada elevador.

Como se señala en la siguiente imagen, cada elevador está constituido por un lado motriz, cuyo motor está siempre acoplado, y otro no motriz, con el motor desacoplado.

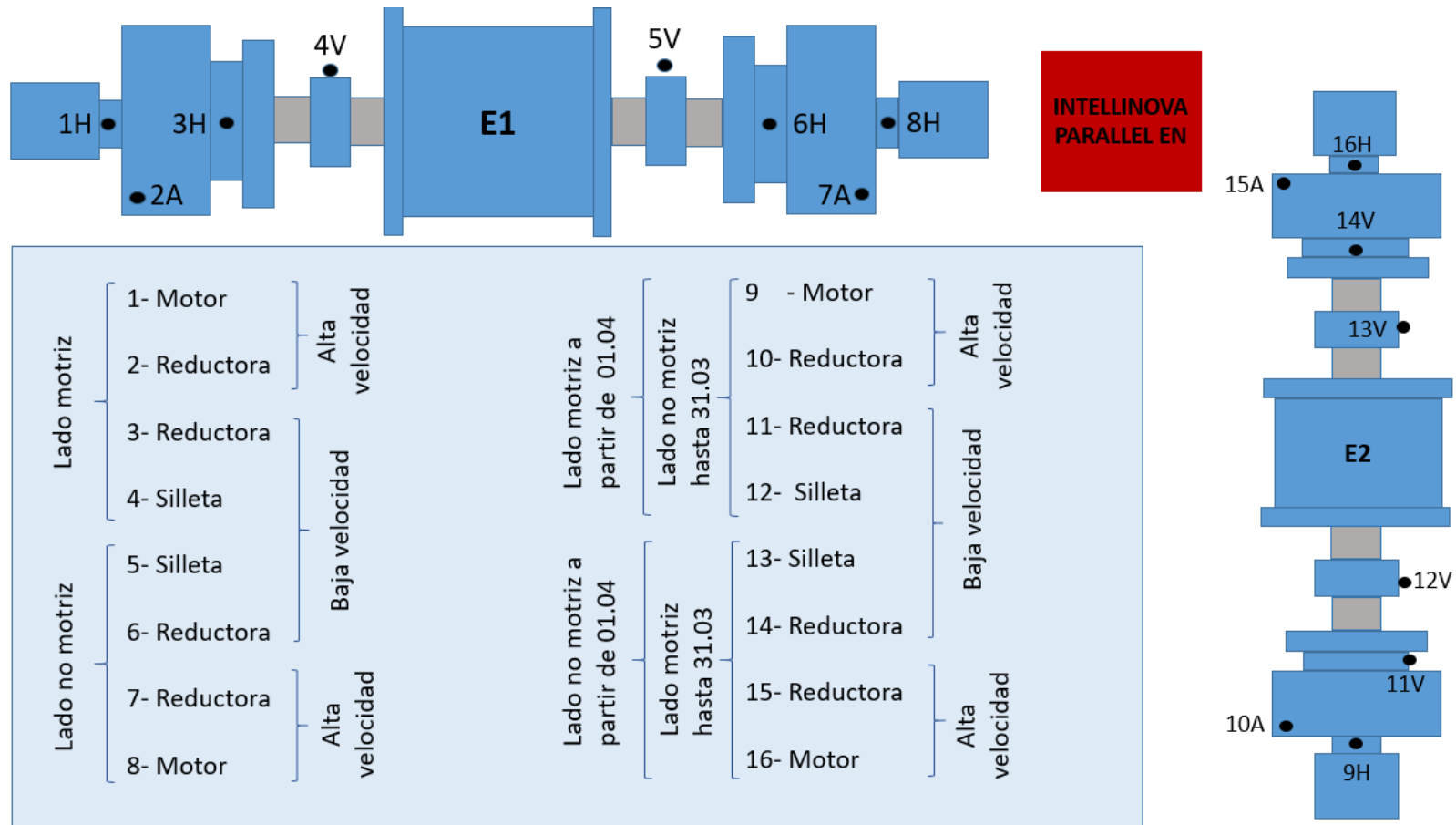


Figura 22. Distribución de sensores.

6.1. PUESTA EN MARCHA.

Cuando se lleva a cabo una inspección de vibración en máquinas, hay que tener en cuenta varios aspectos con el propósito de asegurar la idoneidad de los datos de una medición a la siguiente.

La vibración en una máquina depende de sus parámetros de funcionamiento tales como la velocidad y la carga, y de su estado físico. Se dice que la máquina trabaja en condiciones de funcionamiento normal cuando dichos parámetros se encuentran dentro de los límites establecidos. Esto es un requisito indispensable para poder establecer una tendencia en el tiempo con datos fiables, cada vez que se realicen las mediciones. En este proyecto se cumple esta condición.

Para poder analizar y comprender los datos que se obtienen hay que tener en cuenta varios aspectos relacionados con la configuración interna del software:

- El software permite realizar la descarga de datos en formato Excel. En la tabla Excel se pueden observar columnas con diversas variables, pero las que se tienen en cuenta en este estudio son el punto en el que se realiza la medición, la fecha, la hora, la técnica de medición (HDm, HDc, HDrp, VIB) la velocidad y los niveles de alarma inferior y superior.
- Con la configuración inicial se obtienen aproximadamente el doble de valores de vibración (VIB) que de SPM HD (HDm, HDc) o HD ENV (HDrp). Sin embargo, es posible realizar ajustes en la configuración para equilibrar dichos valores.
- En un primer momento se establecen unos límites de alarma predefinidos por la empresa proveedora según la norma ISO 10817-1 y, tras estudiar el comportamiento de la máquina durante un tiempo, se verifica si dichos límites son los adecuados. En caso de no serlo, es posible reajustarlos. Para ello existen dos umbrales. Por un lado, el umbral aviso, que en caso de ser superado indica el comienzo de un fallo si los valores siguen aumentando. Y, por otro lado, el umbral avería, que en caso de ser superado significa que existe un fallo y hay que comenzar a tomar medidas de corrección.

Para establecer las condiciones que activan un umbral u otro, se emplea la media móvil simple, la cual se calcula promediando los n valores anteriores. En este caso, el valor de n es 50.

Nota: Para los primeros 50 valores, la clasificación se realiza según el propio valor.

- En las técnicas de medición SPM HD y HD ENV, se pueden obtener valores negativos porque se emplean escalas logarítmicas para traducir este tipo de mediciones.
- El sensor inductivo puede medir:
 - La velocidad instantánea de los elementos de baja velocidad.
 - La velocidad media de los elementos de baja velocidad durante los segundos que dura la medición.

Para obtener la velocidad de los elementos de alta velocidad se emplea la relación de transmisión de la reductora. En el elevador 1 la relación de transmisión es 47,91 y en el elevador 2 es 47,65.

Se denominan puntos normalizados aquellos en los que, una vez definido el diámetro y las características del rodamiento, se obtienen mediciones (de las técnicas analizadas), presentadas en una escala normalizada. Estos son los sensores 1,4,5,8 del elevador 1 y los sensores 9,12,13 y 16 del elevador 2.

A continuación, se presenta un cronograma con los pasos seguidos para la puesta en marcha y seguimiento del proyecto:

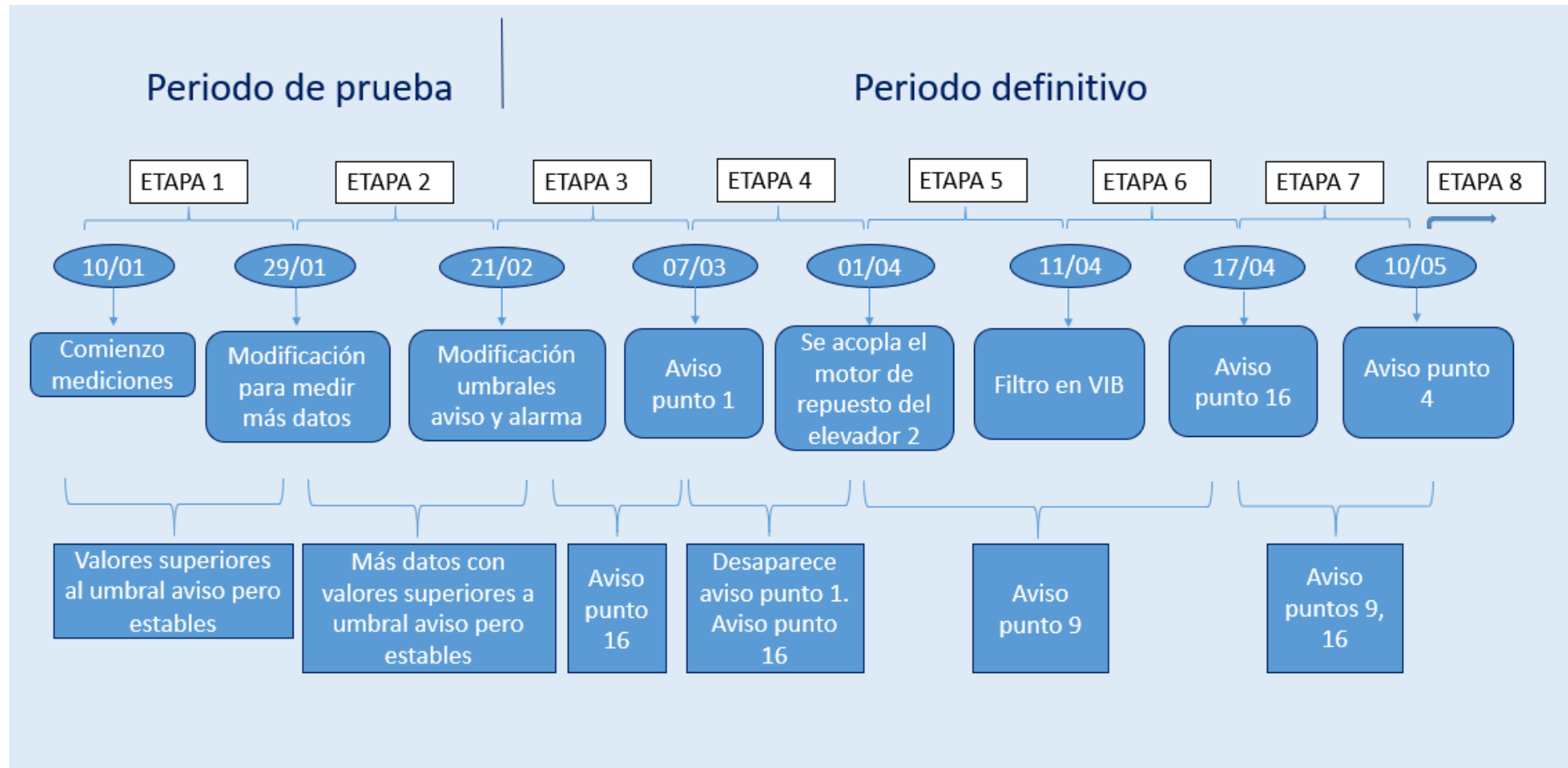


Figura 23. Cronograma seguimiento.

El programa de monitorizado comienza en el mes de enero y se realiza siguiendo varias etapas.

Etapas

La primera etapa dura todo el mes de enero y consiste en un periodo de prueba para observar el comportamiento de cada uno de los elementos del equipo. Para realizar la medición se emplea un trigger (filtro) para almacenar los datos cuya velocidad sea superior a V_{min} (ver Tabla 4).

En la siguiente tabla se reflejan los límites de alarma y los valores del trigger empleados en esta primera etapa:

Elevador	Punto	VIB		HDm (HRPM)		HDrp (LRPM)	Vmin (RPM)
		Umbral aviso	Umbral avería	Umbral aviso	Umbral avería		
1	1	3,5	7	21	35	-	20
	2	3,5	7	21	35	-	20
	3	3,5	7	45	65	-	20
	4	3,5	7	45	65	-	20
	5	3,5	7	45	65	-	20
	6	3,5	7	45	65	-	20
	7	3,5	7	21	35	-	20
	8	3,5	7	21	35	-	20
2	9	3,5	7	21	35	-	30
	10	3,5	7	21	35	-	30
	11	3,5	7	45	65	-	30
	12	3,5	7	45	65	-	30
	13	3,5	7	45	65	-	30
	14	3,5	7	45	65	-	30
	15	3,5	7	21	35	-	30
	16	3,5	7	21	35	-	30

Tabla 4. Valores predefinidos (1).

Con estas condiciones de medición se obtiene, para cada una de las técnicas, el promedio del número de mediciones realizadas cada día para los 16 puntos durante el mes de enero, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Técnica	VIB	HD ENV	SPM HD
Promedio	282	108	102

Tabla 5. Promedio mediciones (1).

Por lo tanto, teniendo en cuenta que las mediciones se realizan en 16 puntos, el número de valores obtenidos para cada punto es muy pequeño para poder sacar conclusiones válidas.

Se observan mediciones de las técnicas SPM HD y VIB que superan el umbral aviso en varios puntos. Este hecho no genera preocupación porque son valores elevados pero estables, lo que significa que se trata del comportamiento propio de estos elementos.

No obstante, es necesario que exista este periodo de prueba ya que constituye el punto de partida para futuras modificaciones.

En la Figura 24 se representa la tendencia del valor de la variable HDm a lo largo del tiempo en el punto 1. Se muestran los valores medios diarios junto a la desviación típica. La línea continua de color rojo hace referencia a una velocidad de giro del eje de entre 0 y 1150 RPM ((0 - 1150]) y se corresponde con la velocidad de bajada del elevador (con carrocería). La línea continua de color azul hace referencia a una velocidad de giro del eje de entre 1150 y 2300 RPM ((1150 - 2300]) y se corresponde con la velocidad de subida del elevador (sin carrocería). Las líneas discontinuas de color amarillo y rojo son los umbrales de aviso y avería, respectivamente. Se observa que al comienzo del mes de enero los valores de HDm son más elevados, superando el umbral aviso establecido para ese periodo de tiempo, debido a que el diámetro del rodamiento del motor aún no estaba normalizado. Sin embargo, una vez solucionado este problema, los valores de HDm descienden y se estabilizan. También se puede ver que a altas velocidades (línea azul) los valores son inferiores con respecto a las de baja velocidad (línea roja) debido a que la ausencia de la carrocería genera menores impactos.

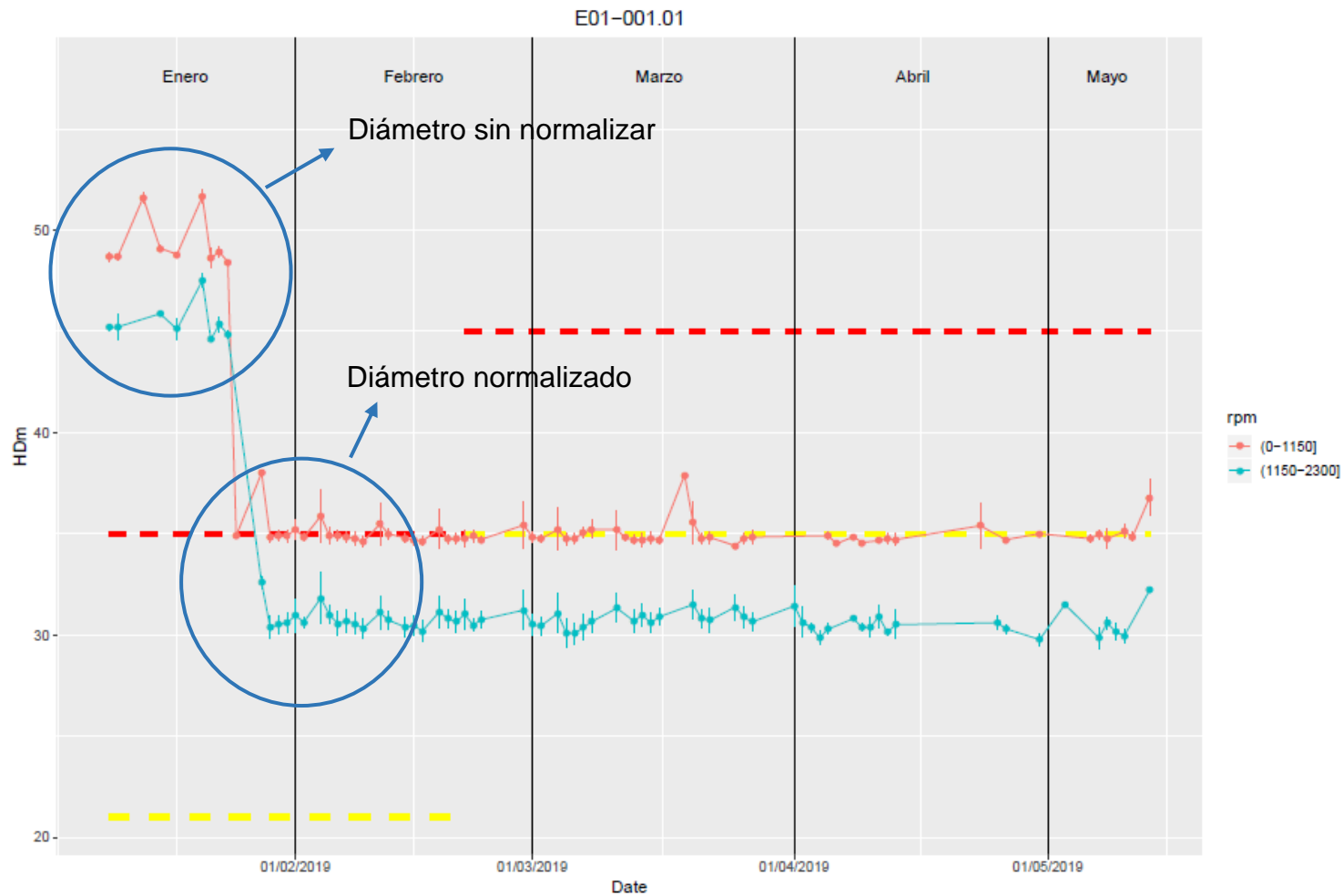


Figura 24. Tendencia HDm punto 1.

Otro punto en el que se superan tanto el umbral aviso como el umbral avería en la tendencia HDm, es el punto 16. En esta primera etapa se pueden observar valores obtenidos a baja y alta velocidad muy por encima del umbral avería debido a que este punto no estaba normalizado, pero estos valores se establecen y disminuyen una vez solucionado este problema, por lo que no generan preocupación. (ver Figura 25).

En la Figura 26 se puede observar la tendencia de la variable HDm en un punto que no se normaliza. Se muestran los valores medios diarios junto a la desviación típica. En este caso existe un comportamiento estable a lo largo de todo el periodo de estudio sin poder distinguir ningún descenso en los valores de esta variable, en comparación con lo que ocurre en el punto 1 cuyo diámetro se normaliza.

Tanto los valores de HDm obtenidos a baja velocidad como los obtenidos a alta velocidad superan el umbral avería en esta primera etapa, y el umbral aviso en las siguientes etapas. Sin embargo, al tratarse de un punto no normalizado estos resultados no son reales y queda pendiente obtener la información necesaria para poder normalizarlo y sacar conclusiones fiables.

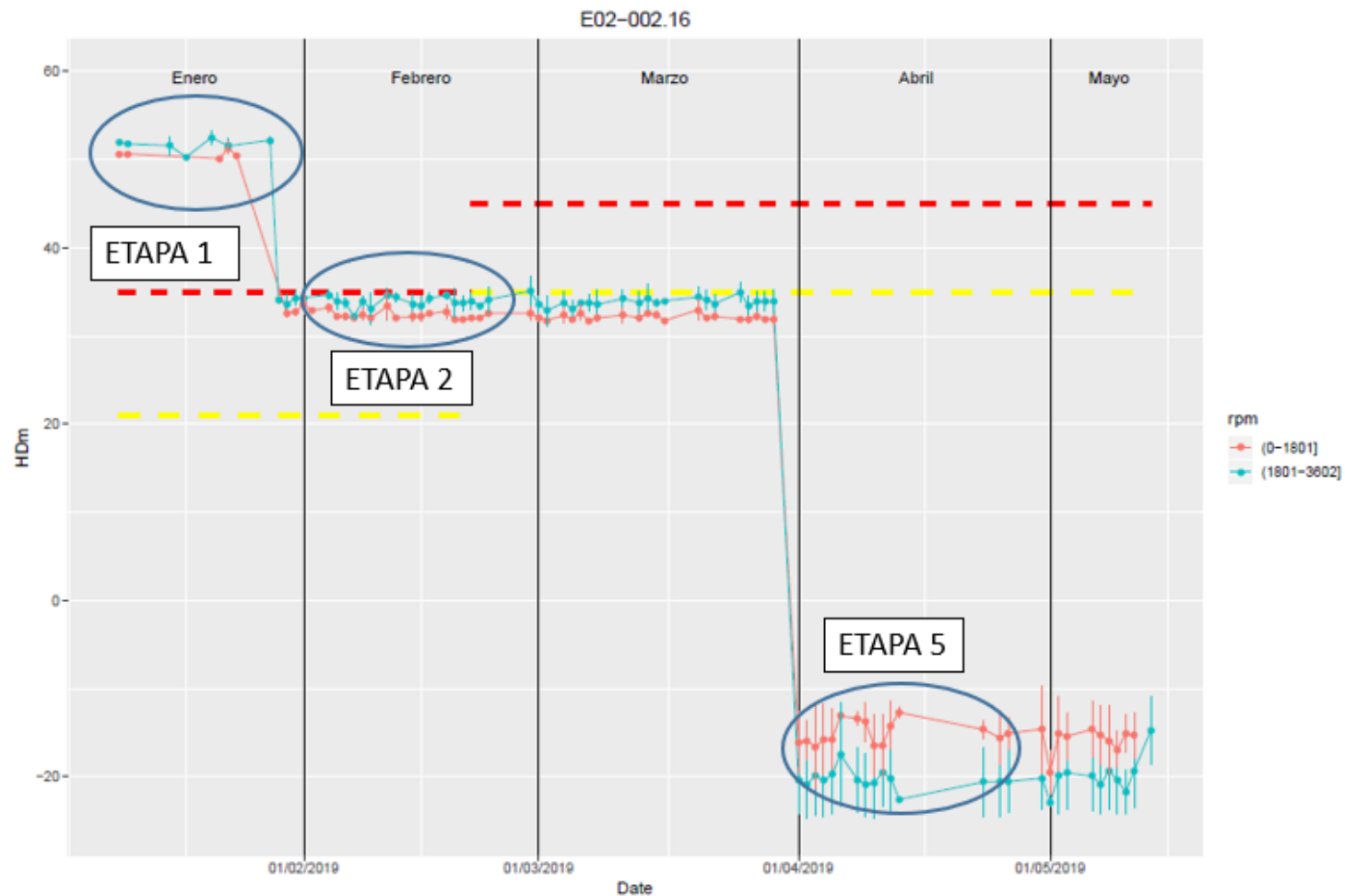


Figura 25. Tendencia HDm punto 16.



Figura 26. Tendencia HDm punto 2.

En la Figura 27 se representa la tendencia del valor de la variable VIB a lo largo del tiempo en el punto 16. Se muestran los valores medios diarios junto a la desviación típica. La línea continua de color rojo hace referencia a una velocidad de giro del eje de entre 0 y 1801 RPM ((0 - 1801]) y se corresponde con la velocidad de bajada del elevador (sin carrocería). La línea continua de color azul hace referencia a una velocidad de giro del eje de entre 1801 y 3602 RPM ((1801 - 3602]) y se corresponde con la velocidad de subida del elevador (con carrocería). Las líneas discontinuas de color amarillo y rojo son los umbrales de aviso y avería, respectivamente. Se observa que los valores de VIB se mantienen constantes a lo largo de este periodo y superando ligeramente el umbral aviso. También se puede ver que a bajas velocidades (línea roja) los valores son inferiores con respecto a las de alta velocidad (línea azul) debido a que la ausencia de la carrocería genera menores vibraciones.

Los valores de HDc están directamente relacionados con los valores de HDm. La variable HDc toma valores más bajos cuando las amplitudes de los impulsos de choque son también bajas, es decir, cuando los rodamientos están bien lubricados. En condiciones de operación con una lubricación deficiente, aumentan los impulsos de choque y, por tanto, esto resulta en valores de HDc más elevados.

Esto se refleja en la Figura 28 en la que se puede observar que la tendencia HDc es similar a la tendencia HDm en el punto 1. Una vez que se normaliza este punto los valores de HDc sufren un descenso y se estabilizan.

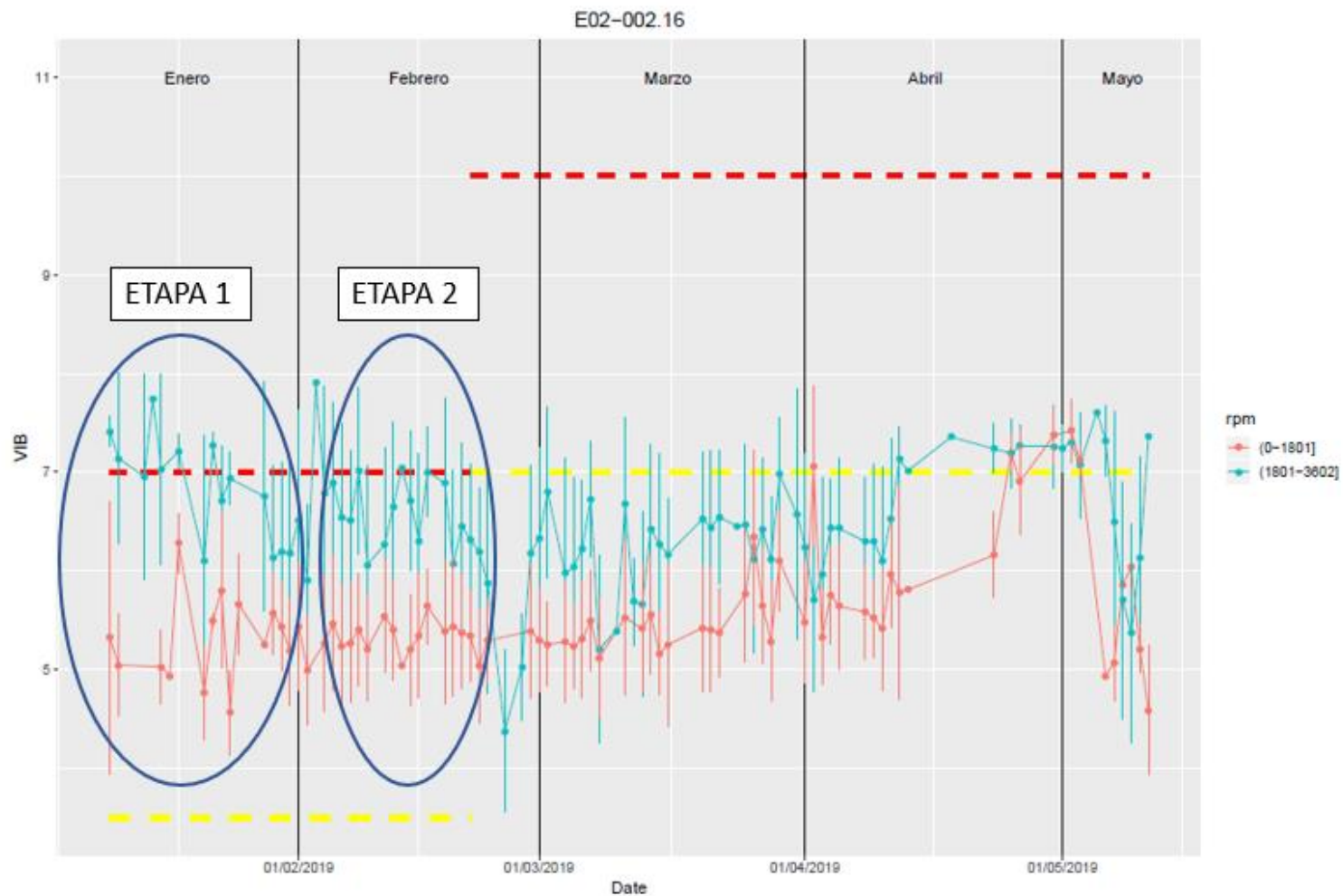


Figura 27. Tendencia VIB punto 16.

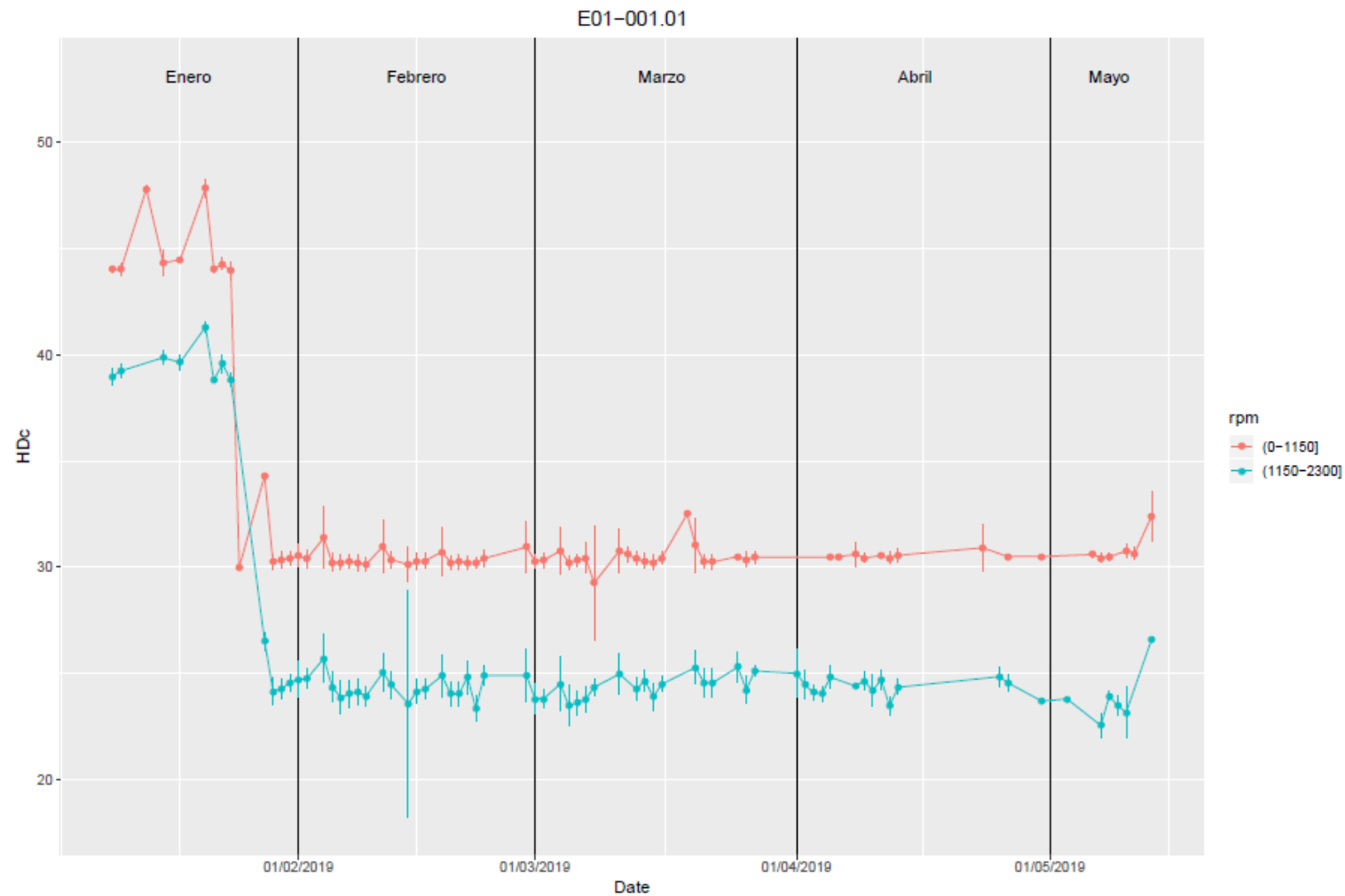


Figura 28. Tendencia HDc punto 1.

Para ver la tendencia VIB, HDm y HDc para el resto de los puntos normalizados, véase [ANEXO B. TENDENCIAS VIB, HDm y HDc](#).

Etapas 2

En esta etapa se realiza una configuración interna del software para conseguir aumentar el número de mediciones por cada técnica. Se mantienen los mismos umbrales y valores de trigger.

En este caso, con las mismas condiciones de medición vistas en la etapa 1 se obtiene de nuevo, para cada una de las técnicas, el promedio del número de mediciones realizadas cada día para los 16 puntos con los datos obtenidos hasta la fecha, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Técnica	VIB	HD ENV	SPM HD
Promedio	4285	1658	1693

Tabla 6. Promedio mediciones (2).

Se vuelven a observar mediciones de la técnica SPM HD y VIB por encima del umbral aviso en varios puntos. De esta manera se confirma que, aunque se trate de valores elevados pero estables, es el comportamiento propio en estos elementos.

En la Figura 29 se representa la tendencia del valor de la variable HDm a lo largo del tiempo en el punto 4 del elevador 1. Se muestran los valores medios diarios junto a la desviación típica. La línea continua de color rojo hace referencia a una velocidad de giro del eje de entre 22 y 24 RPM ((22 - 24]) y se corresponde con la velocidad de bajada del elevador (con carrocería). La línea continua de color azul hace referencia a una velocidad de giro del eje de entre 24 y 27 RPM ((24 - 27]) y se corresponde con la velocidad de subida del elevador (sin carrocería). Las líneas discontinuas de color amarillo y rojo son los umbrales de aviso y avería, respectivamente. Se observa que los valores de HDm son más elevados en esta etapa llegando a superar el umbral aviso. También se puede ver que a bajas velocidades (línea roja) los valores son superiores, en algunos tramos, con respecto a los de alta velocidad (línea azul) debido a que la presencia de la carrocería genera mayores impactos.

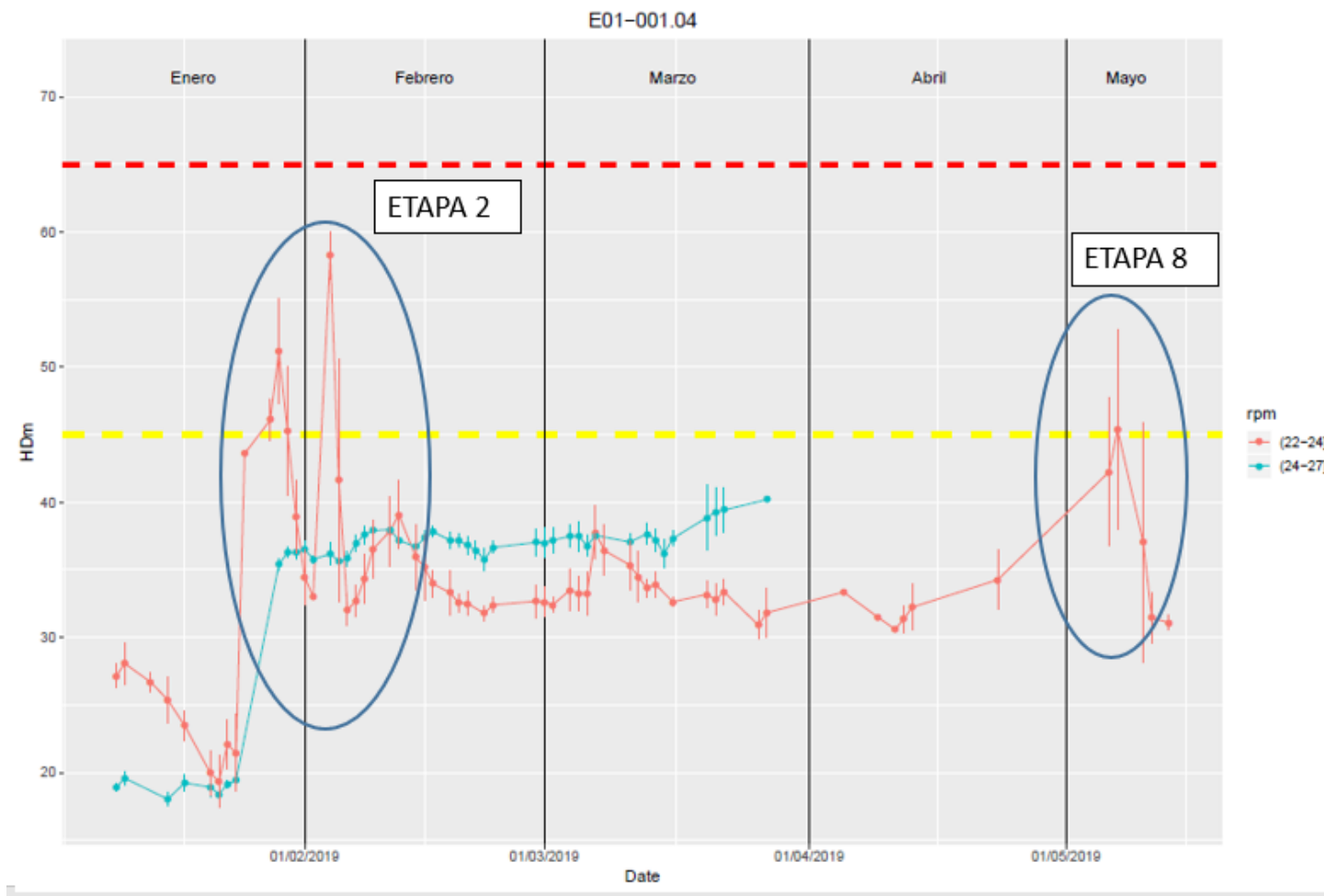


Figura 29. Tendencia HDm punto 4.

En el punto 16 del elevador 2, se observan valores de la técnica HDm por encima del umbral aviso tanto en bajas como en altas velocidades (ver figura 25).

También se pueden ver en este mismo punto valores de la técnica VIB por encima del umbral aviso y avería en bajas y altas velocidades respectivamente (ver figura 27).

En esta etapa el punto 9 se correspondía con el motor del lado no motriz. Aun así, se observaron valores de la técnica VIB por encima del umbral aviso y avería tanto en bajas como en altas velocidades. Esto se puede deber a que se trata de un elemento en voladizo (ver figura 30).

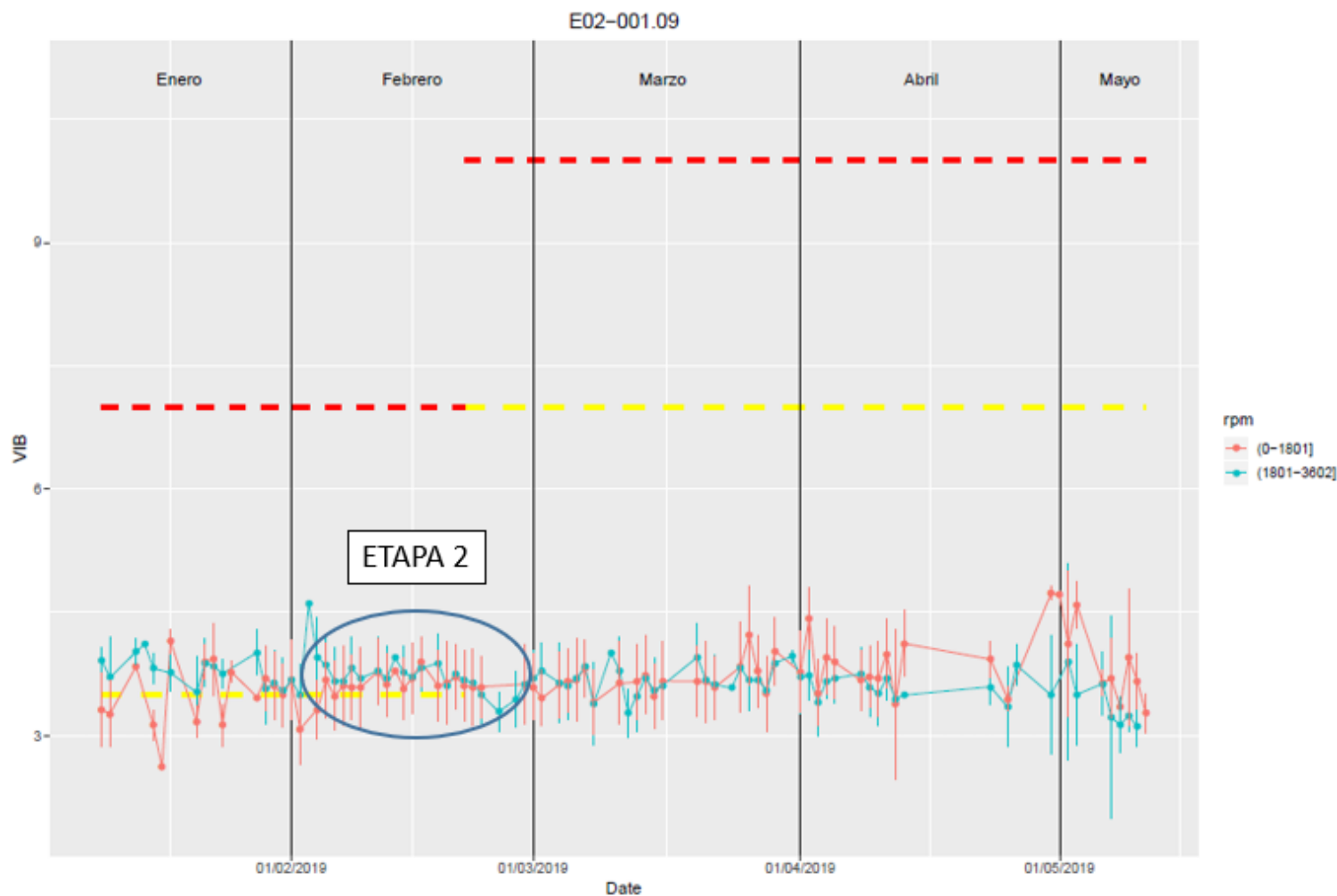


Figura 30. Tendencia VIB punto 9.

Etapas 3

Hasta ahora se han tomado las mediciones con unos umbrales de aviso y alarma establecidos según la norma ISO 10817-1. Sin embargo, se observa que los elementos trabajan en unos umbrales superiores en algunos de los puntos. Esto provoca que salten avisos y alarmas que no son reales. Por tanto, es necesario modificarlos para obtener unos resultados fiables. También se ha modificado el valor del trigger para almacenar únicamente las mediciones que se dan a unas velocidades superiores por ser éstas más críticas, ya que, cuando el movimiento del elevador se produce alta velocidad o con mayor carga, la vibración también es mayor. Los umbrales que han sido modificados aparecen subrayados en la siguiente tabla:

Puntos	VIB		HDm (LRPM)		HDrp (LRPM)		Vmin (RPM)
	Umbral aviso	Umbral avería	Umbral aviso	Umbral avería	Umbral aviso	Umbral avería	
1	3,5	7	<u>35</u>	<u>45</u>	<u>25</u>	<u>35</u>	23
2	3,5	7	<u>35</u>	<u>45</u>	<u>25</u>	<u>35</u>	23
3	3,5	7	45	65	<u>35</u>	<u>45</u>	23
4	3,5	7	45	65	<u>35</u>	<u>45</u>	23
5	3,5	7	45	65	<u>35</u>	<u>45</u>	23
6	3,5	7	45	65	<u>35</u>	<u>45</u>	23
7	3,5	7	<u>35</u>	<u>45</u>	<u>25</u>	<u>35</u>	23
8	3,5	7	<u>35</u>	<u>45</u>	<u>25</u>	<u>35</u>	23
9	<u>7</u>	<u>10</u>	<u>35</u>	<u>45</u>	<u>25</u>	<u>35</u>	35
10	3,5	7	<u>35</u>	<u>45</u>	<u>25</u>	<u>35</u>	35
11	3,5	7	45	65	<u>35</u>	<u>45</u>	35
12	3,5	7	45	65	<u>35</u>	<u>45</u>	35
13	3,5	7	45	65	<u>35</u>	<u>45</u>	35
14	3,5	7	45	65	<u>35</u>	<u>45</u>	35
15	3,5	7	<u>35</u>	<u>45</u>	<u>25</u>	<u>35</u>	35
16	<u>7</u>	<u>10</u>	<u>35</u>	<u>45</u>	<u>25</u>	<u>35</u>	35

Tabla 7. Valores predefinidos (2).

Con estas condiciones de medición, se observa lo siguiente:

- Punto 16 (motor elevador 2): Se supera el umbral aviso con la técnica VIB. Esto puede deberse a que el motor es un elemento de alta velocidad y además se encuentra en voladizo.

Los elementos de alta velocidad del lado motriz de cualquier tipo de transmisión, como el motor y la reductora de estos elevadores, sufren mayores vibraciones e impactos. Además, si estos elementos están en voladizo el problema se agrava aún más. Por tanto, estos puntos son críticos.

A continuación, se observan todos los valores instantáneos medidos entre las fechas representadas. Los tramos en los que no existen datos coinciden con periodos en los que no hay producción debido a fines de semana o parada de producción por diversos motivos. Las mediciones que se obtienen son estables, aunque ligeramente superiores al umbral aviso, pero no se consideran alarmantes. Aun así, se realizará un seguimiento de las mismas para observar si se producen variaciones. (ver figura 31). En los demás puntos no se observan anomalías.

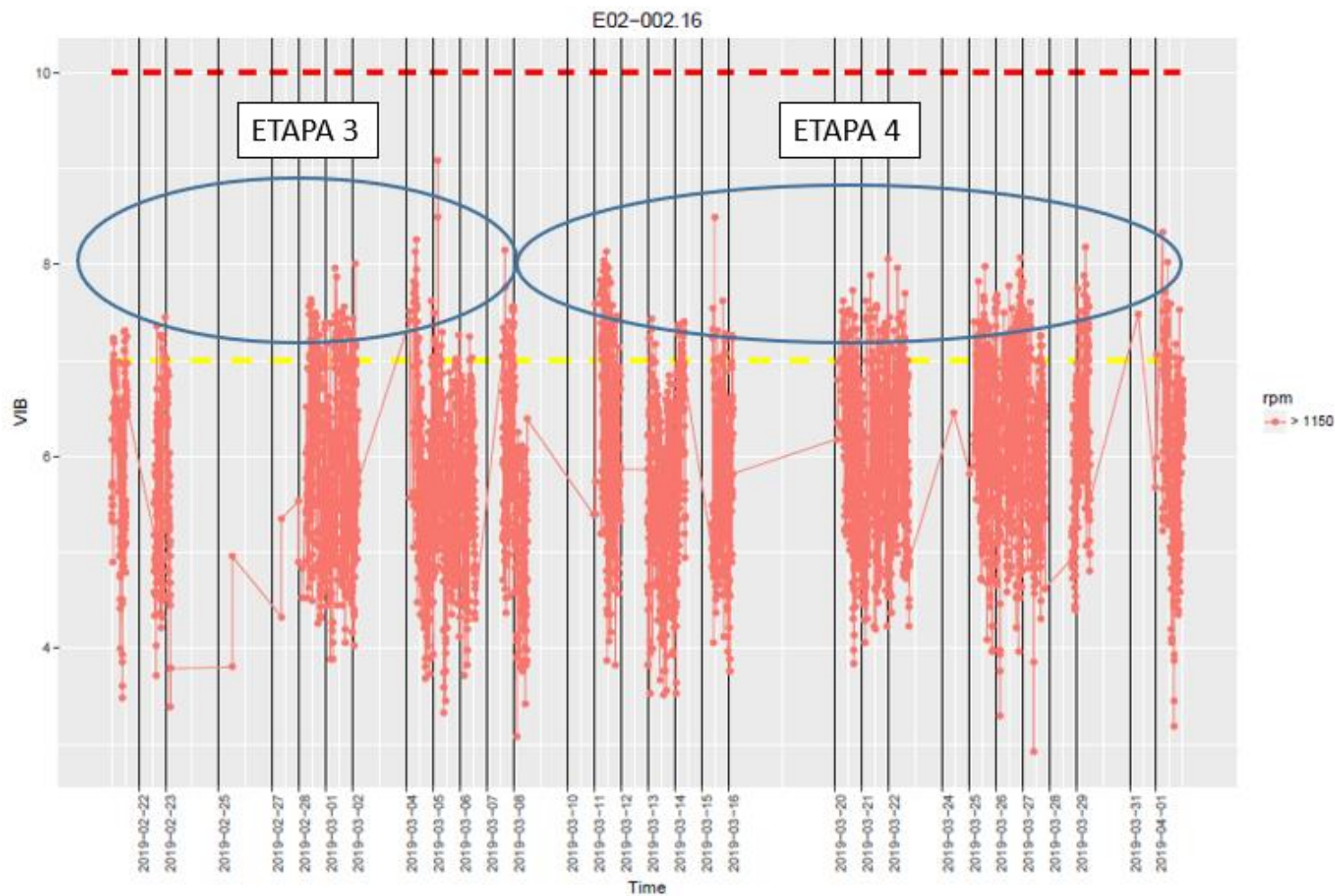


Figura 31. Tendencia VIB punto 16 – instantáneos.

Etapas 4

Se detecta un aviso en el punto 1 con la técnica SPM HD en bajas velocidades, pero pasado un tiempo las mediciones vuelven a ser válidas. La siguiente gráfica muestra todos los valores instantáneos medidos entre las fechas representadas. La línea continua de color rojo se corresponde con una velocidad de giro del eje inferior a 1150 RPM y representa la velocidad de bajada del elevador (con carrocería). Las líneas discontinuas de color amarillo y rojo son los umbrales de aviso y avería, respectivamente. El aviso detectado se cree que puede deberse a que la presencia de la carrocería produce mayores impactos, lo que podría generar que se supere el umbral aviso puntualmente (ver figura 32). Sin embargo, en este caso, es probable que el aviso se deba a un impacto del skid con el carro de elevación. El resto de las mediciones se mantienen constantes en todos los puntos, incluido el 16 que sigue dando avisos (ver Figura 31).

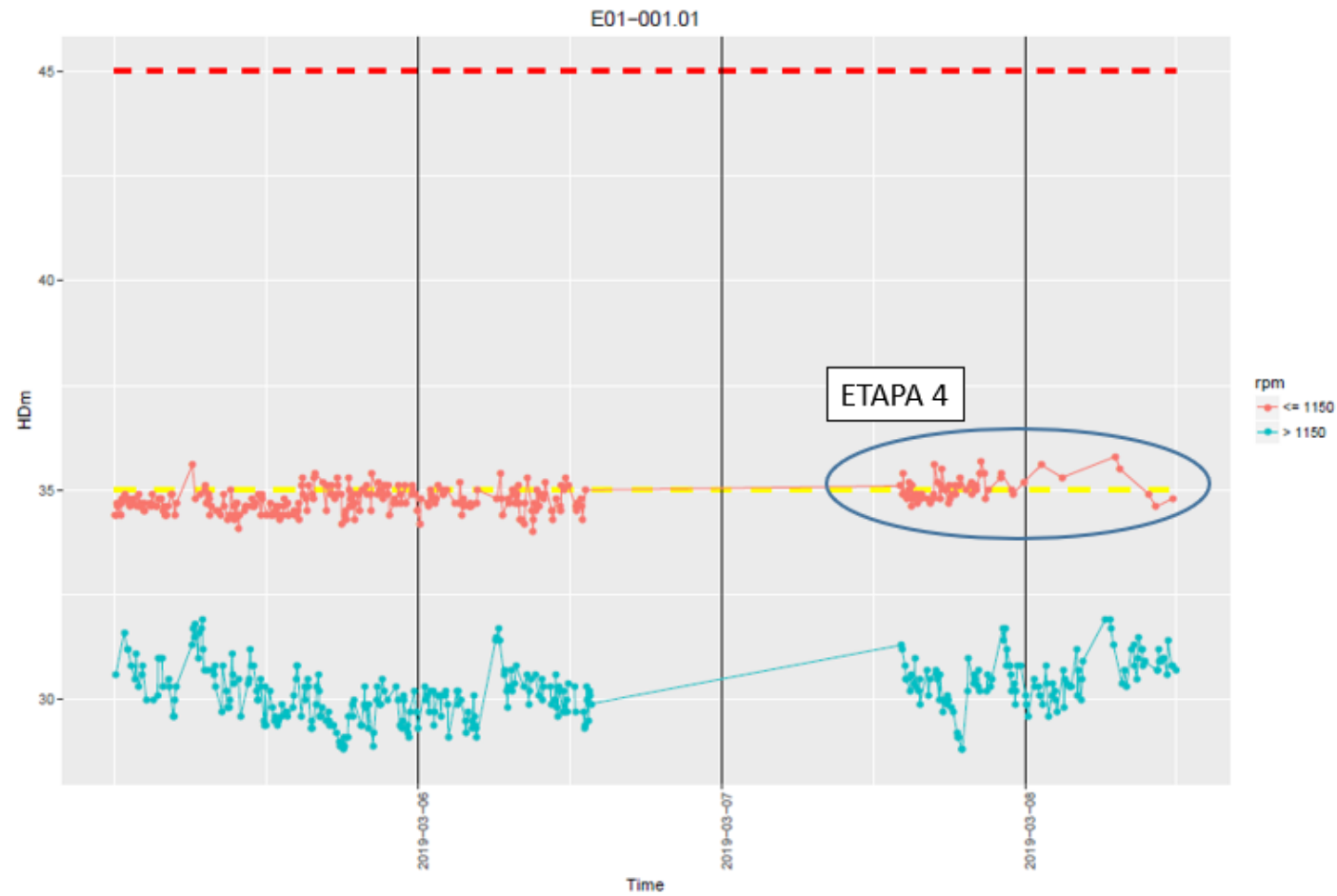


Figura 32. Tendencia HDm punto 1 – instantáneos.

Etapas 5

En el elevador 2 se realiza una modificación, acoplado el otro motor, pasando entonces a ser puntos críticos a estudiar, el 9 (motor), 10 (reductora), 11 (reductora) y 12 (silleta). Se observa un incremento en los valores de la variable HDm en el punto 9 causado por esta modificación, pero no es motivo de alerta porque se mantienen estables en el tiempo y por debajo del umbral aviso (comportamiento propio del elemento) (ver figura 33). Del mismo modo, se observa un incremento en los valores de la técnica HDm en el punto 10 que también pasa a formar parte del lado motriz, pero no es motivo de estudio por tratarse de un punto no normalizado (ver figura 34).

En el momento en el que se produce la modificación del elevador 2 pasan a formar parte del lado no motriz los puntos 13, 14, 15 y 16, observándose un descenso en los valores de la técnica HDm (ver figuras 25 y 35).

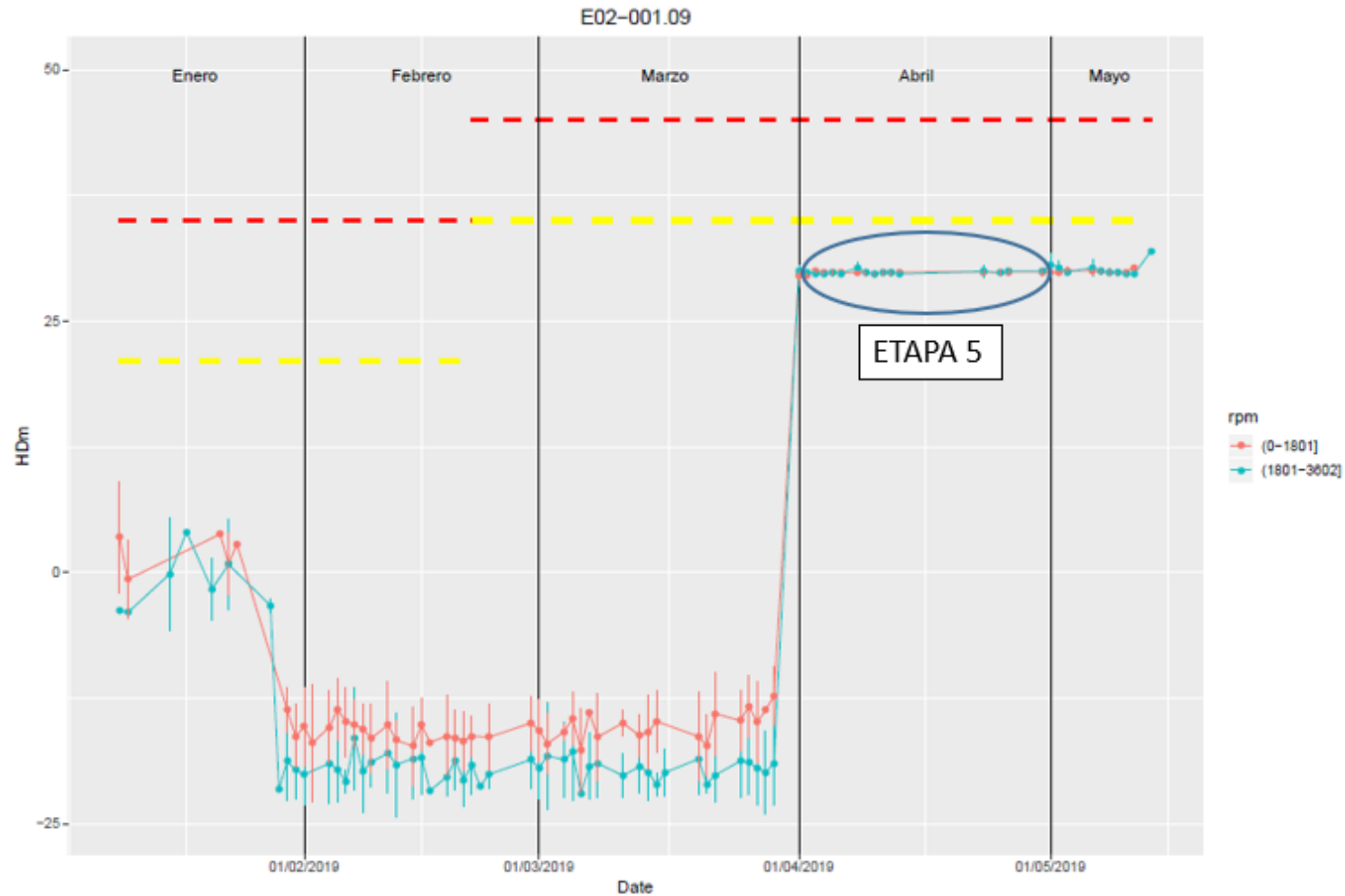


Figura 33. Tendencia HDm punto 9 – lado motriz.

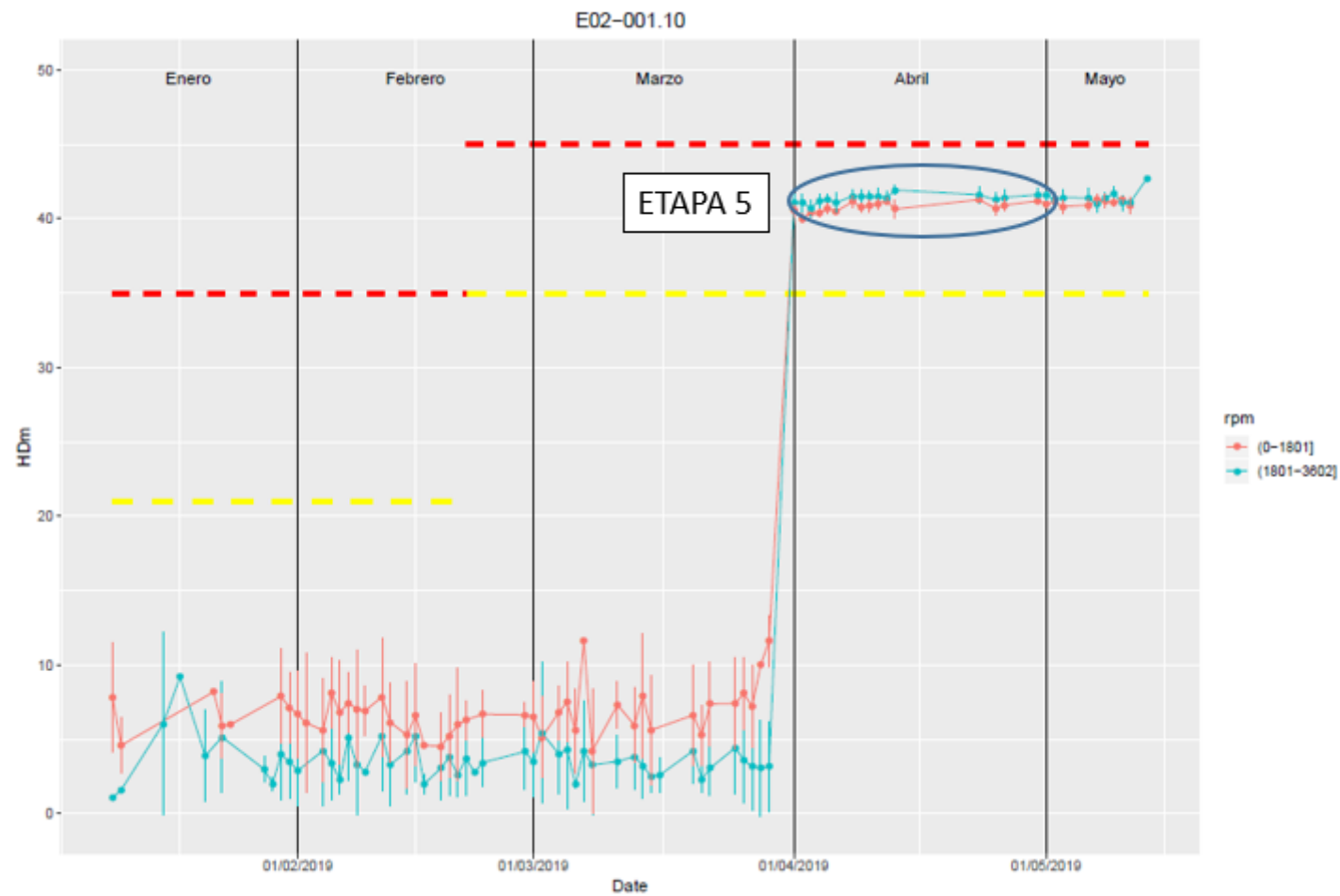


Figura 34. Tendencia HDm punto 10 – lado motriz.

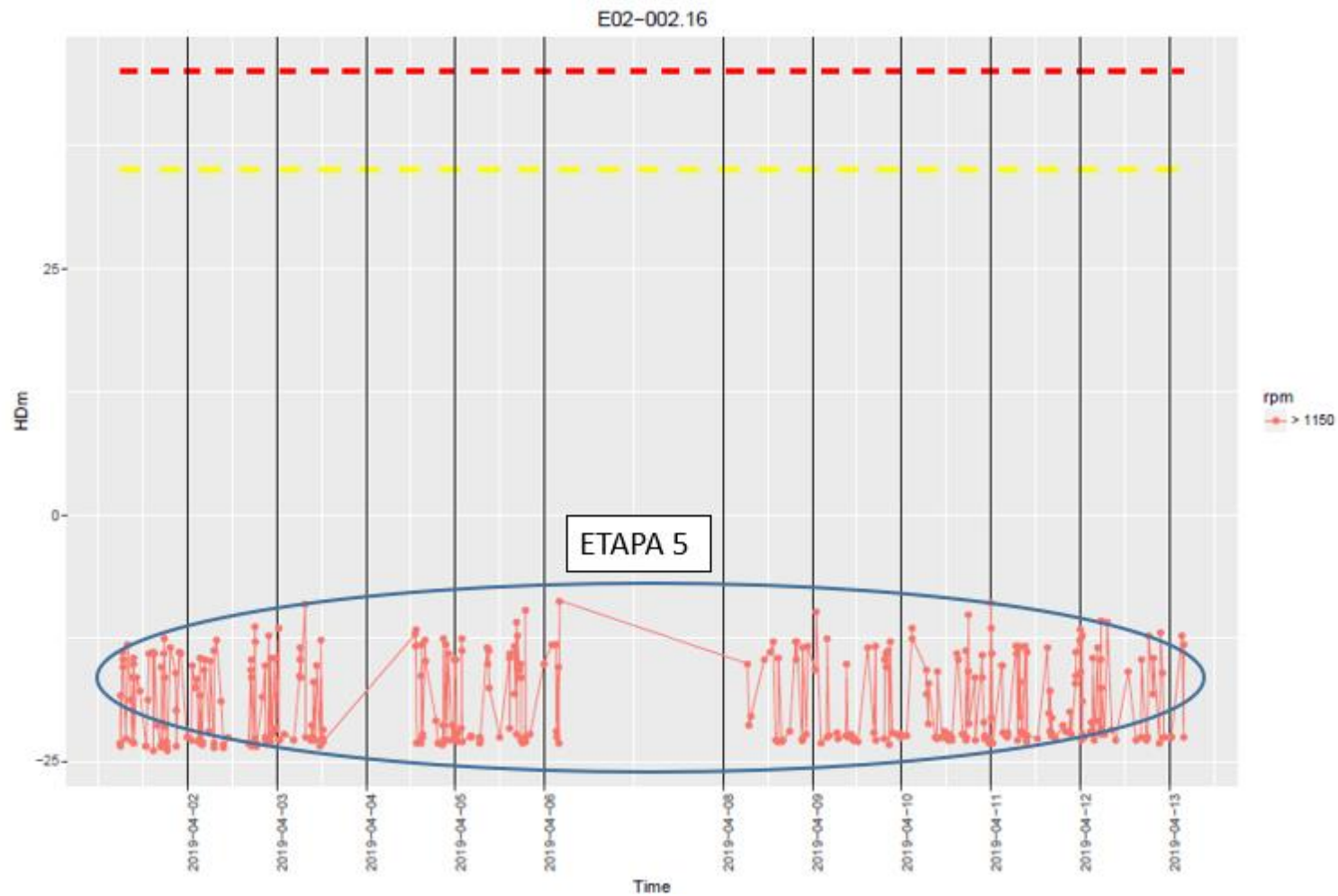


Figura 35. Tendencia HDm punto 16 – instantáneos.

Etapas 6

Con el objetivo de disminuir la cantidad de datos (no significativos) almacenados y equilibrar el número de mediciones de todas las técnicas se establece un nuevo filtro para la variable VIB en ambos elevadores. Este filtro almacena todos los datos cuyos valores de vibración sean superiores al umbral aviso, y también 1 de cada 30 datos inferiores a dicho umbral. En el resto de las técnicas no se añaden filtros. No se observan cambios significativos en el valor de las mediciones.

Etapas 7

Aparece un aviso en el punto 16 en la variable VIB (ver figura 36), a pesar de ser el motor del lado no motriz y no estar acoplado en la actualidad (no tiene actividad). Se deduce que estos valores más elevados no se deben a un problema de vibración del motor porque los valores de impacto (técnica SPM HD) son estables y están por debajo del umbral de aviso, sino que se deben a una vibración de la estructura que detecta el sensor de ese punto y da un falso aviso. Para evitar este tipo de alarmas falsas se va a aplicar un filtro que elimine estos errores.

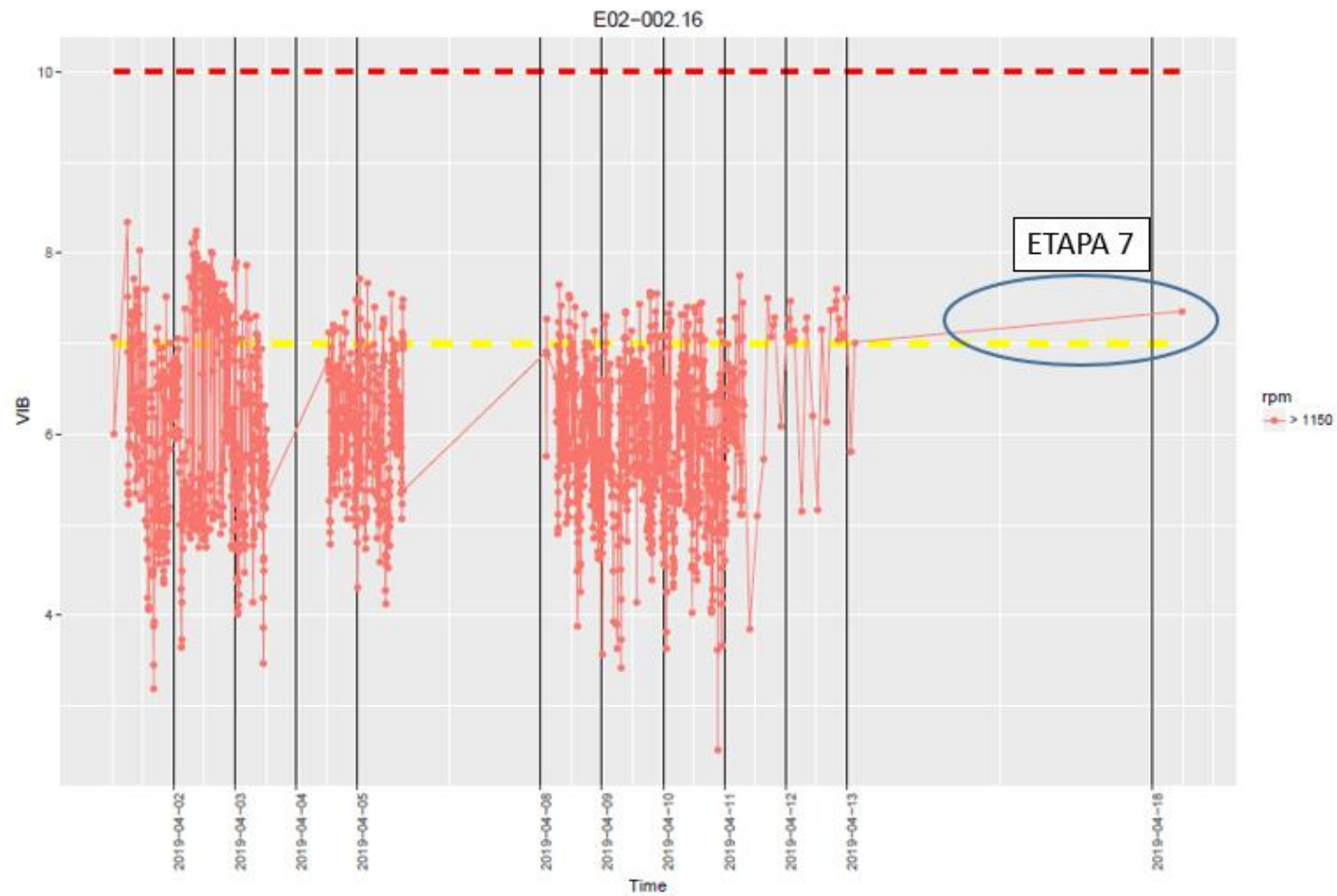


Figura 36. Tendencia VIB punto 16 - instantáneos.

Etapas 8

Se observa que los puntos 3 (reductora elevador 1) y 4 (silleta elevador 1) superan el umbral de aviso en la técnica HDm (ver figura 37). En el punto 3 había existido desde el inicio un impacto suave que se produce a una velocidad de giro del eje de 26,9 RPM (se corresponde con el movimiento de subida del elevador) pero permaneciendo siempre por debajo del umbral de aviso. Sin embargo, en esta etapa este impacto llega a alcanzar valores de HDm de hasta 58,59 dB, superando así el umbral de aviso. Este suceso no genera preocupación ya que el punto 3 no está normalizado, pero es aconsejable comparar las mediciones de estos puntos con las mediciones de sus equivalentes cuando se acople el motor del lado no motriz, para conocer si este es un comportamiento propio de la reductora.

En la siguiente figura se muestran todos los valores instantáneos recogidos entre las fechas representadas. La línea continua de color rojo se corresponde con una velocidad de giro del eje inferior a 24 RPM y representa la velocidad de bajada del elevador (con carrocería). Las líneas discontinuas de color amarillo y rojo son los umbrales de aviso y avería, respectivamente. Se puede observar que los valores de la técnica HDm son bastante elevados y superan el umbral avería puntualmente, alcanzando posteriormente unos valores situados por debajo del umbral aviso. Este hecho posiblemente se deba a un impacto entre la carrocería y el skid, pero es necesario llevar a cabo un seguimiento para conocer si este comportamiento indica un comienzo de fallo en este elemento.



Para analizar la evolución de las variables VIB, HDm y HDc a lo largo del periodo de estudio se emplean dos herramientas estadísticas que permiten interpretar con mayor facilidad los datos obtenidos. Estas son los diagramas de cajas o boxplots y la matriz de gráfico de dispersión.

A continuación, se introducen los diagramas de cajas (boxplots) que permiten visualizar las variables numéricas estudiadas con sus medidas de dispersión.

En estos diagramas se pueden visualizar los valores de los cuartiles 1, 2 y 3, los extremos y los valores atípicos:

- Primer cuartil: el 25% de los valores son menores o iguales a este valor.
- Mediana o segundo cuartil: Divide en dos partes iguales la distribución, de forma que el 50% de los valores son menores o iguales a este valor.
- Tercer cuartil: el 75% de los valores son menores o iguales a este valor.
- Los extremos son los valores superior e inferior.
- Los valores atípicos son aquellos puntos que están más allá del punto superior e inferior.

En la siguiente imagen se puede ver la evolución del valor de la variable HDm a lo largo del periodo de estudio en el punto 1, representado mediante un diagrama de cajas. Cada caja representa los valores de un mes; enero, febrero, marzo, abril y mayo respectivamente. Se puede observar que para bajas velocidades los valores están más concentrados, es decir hay poca dispersión, son muy próximos al umbral aviso y se mantienen estables en el tiempo. Sin embargo, para altas velocidades los valores son más dispersos, y se mantienen estables en el tiempo, pero se encuentran por debajo del umbral aviso. Esto se debe a que el elevador 1 a alta velocidad genera un movimiento de subida y lo hace sin carrocería, por lo que se generan menos impactos y los rodamientos se conservan en mejor estado.

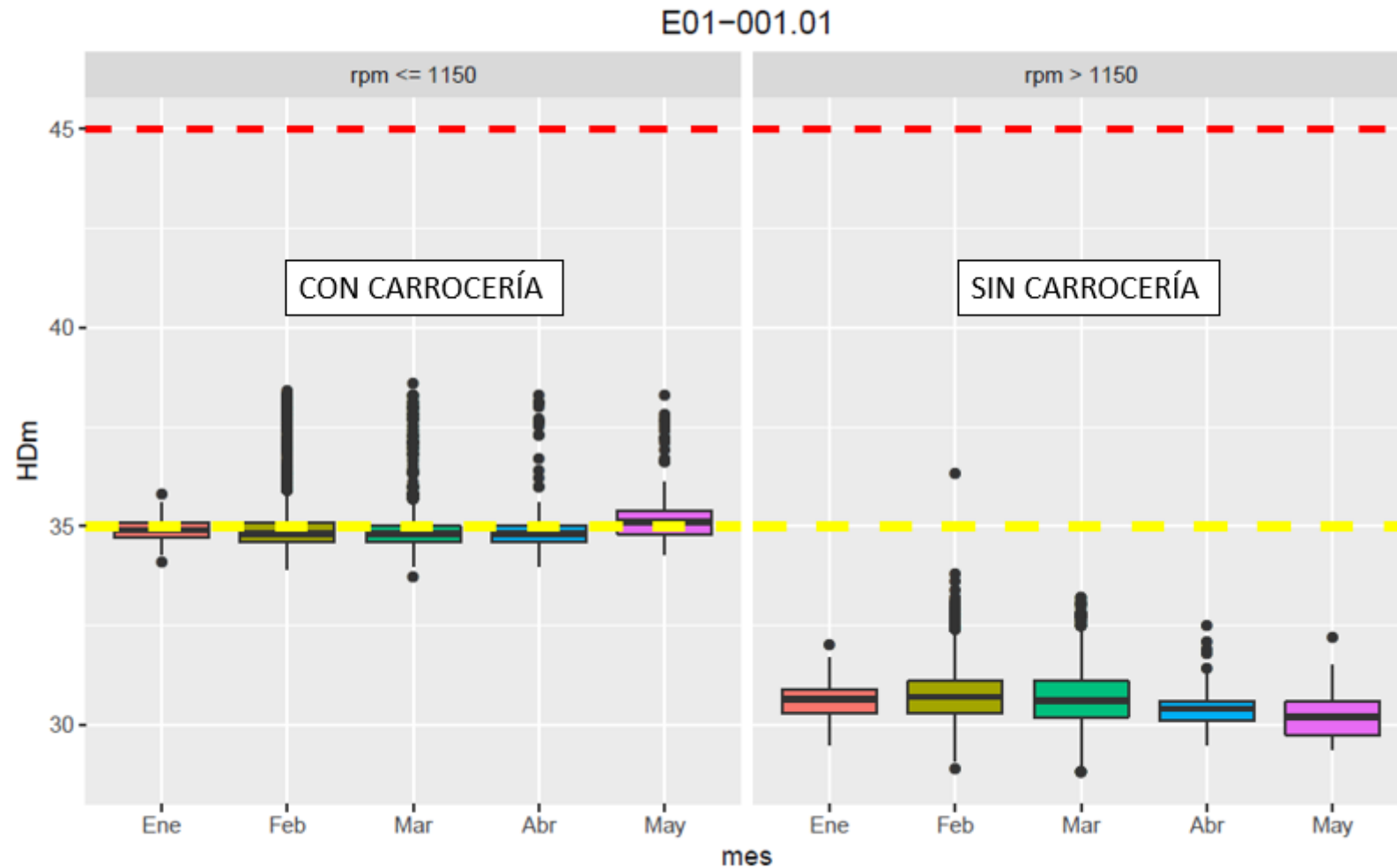


Figura 38. Diagrama de cajas – Tendencia HDm punto 1.

En la siguiente imagen se puede ver la evolución del valor de la variable HDm a lo largo del periodo de estudio en el punto 16, representado mediante un diagrama de cajas. Durante los meses de enero, febrero y marzo (temporada en la que el motor formaba parte del lado motriz), los valores para bajas velocidades están muy concentrados, hay poca dispersión y se mantienen por debajo del umbral aviso, excepto durante el mes de febrero y marzo en los que los valores atípicos se encuentran por encima del umbral aviso, como se comentó en la Etapa 2.

Ocurre lo mismo con los valores obtenidos en altas velocidades con la diferencia de que son ligeramente superiores a los obtenidos en bajas velocidades. Esto es debido a que el elevador 2 a altas velocidades sube cargado, lo cual genera mayores impactos.

En ambos casos es muy visible el descenso de los valores a partir del mes de abril en el que el motor deja de estar acoplado.

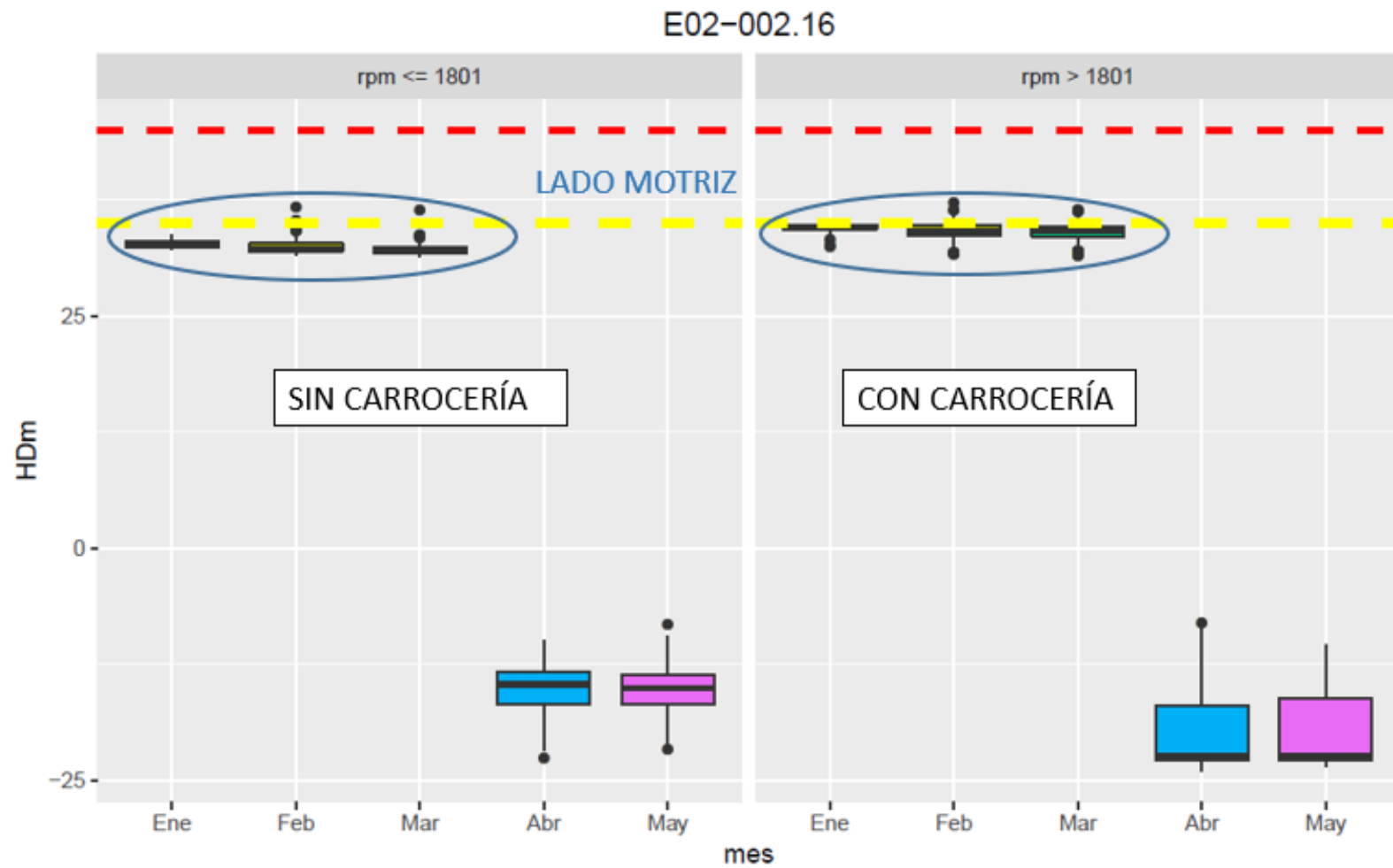


Figura 39. Diagrama de cajas – Tendencia HDm punto 16

En la siguiente imagen se puede ver la evolución del valor de la variable HDm a lo largo del periodo de estudio en el punto 9, representado mediante un diagrama de cajas. Durante los meses de enero, febrero y marzo (temporada en la que el motor formaba parte del lado no motriz), los valores para bajas velocidades se mantienen por debajo del umbral aviso. A partir del mes de abril, momento en el que se acopla este motor se observa como los valores de esta variable aumentan sin llegar a superar el umbral aviso.

Ocurre lo mismo con los valores obtenidos en altas velocidades con la diferencia de que son ligeramente inferiores a los obtenidos en bajas velocidades.

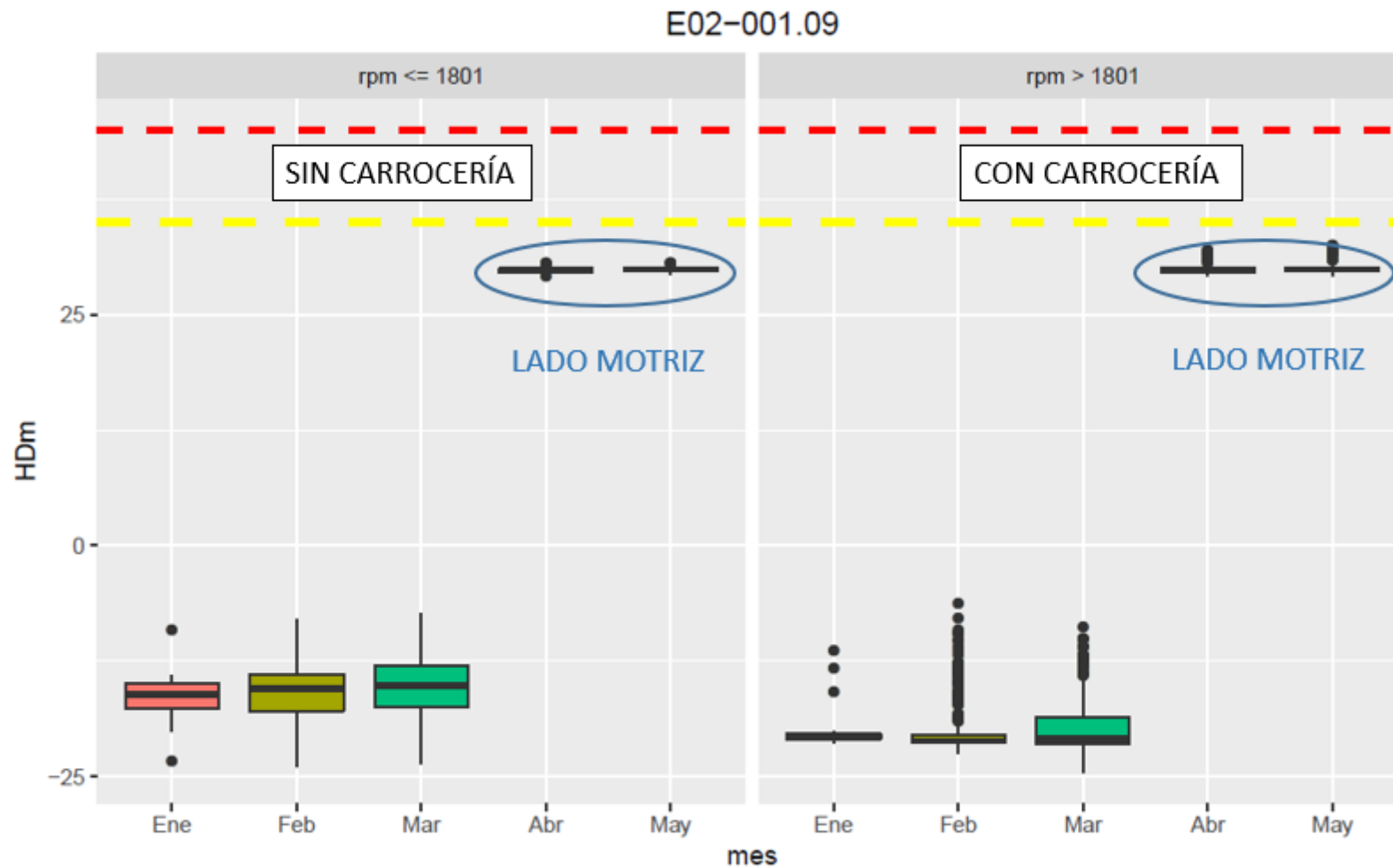


Figura 40. Diagrama de cajas - Tendencia HDm punto 9.

Realizando una comparación entre los elementos homólogos de ambos elevadores, punto 1 – punto 16 (lado motriz del elevador 2 hasta abril) y punto 1 – punto 9 (lado motriz del elevador 2 a partir de abril), respectivamente, con respecto a los valores obtenidos de la variable HDm, se observa lo siguiente:

- El elevador 1 realiza el movimiento de bajada a baja velocidad y cargado. En el punto 1 de este elevador para bajas velocidades se obtienen valores superiores de HDm con respecto a los obtenidos a altas velocidades y alcanzan el umbral aviso. En este punto se alcanzan los valores de la técnica HDm más altos a pesar de ser este elevador nuevo y estar este elemento bien sujeto a la estructura (no está en voladizo como en el caso del elevador 2).
- El elevador 2 realiza el movimiento de subida a alta velocidad y cargado. En el punto 16 de este elevador, que es el lado motriz hasta abril, para altas velocidades se obtienen valores ligeramente superiores de HDm, con respecto a los obtenidos a bajas velocidades, debido a la carga de la carrocería, y alcanzan el umbral aviso. Este punto tiene un comportamiento de la técnica HDm muy similar al punto 1 del elevador 1 a pesar de ser este punto más antiguo que el elevador 1 y estar este punto en voladizo.
- En el punto 9 de este elevador para bajas velocidades se obtienen valores ligeramente inferiores de HDm con respecto a los obtenidos a altas velocidades, pero en ningún caso se alcanza el umbral aviso, a pesar de ser este elevador más antiguo que el elevador 1 y estar este punto en voladizo.
- Aparentemente no influye la antigüedad del elevador, ni que el elemento en el que se realiza la medición esté en voladizo, en los resultados obtenidos en las mediciones de la técnica HDm.

En la siguiente imagen se puede ver la evolución del valor de la variable VIB a lo largo del periodo de estudio en el punto 1, representado mediante un diagrama de cajas. Se observa que tanto para bajas velocidades como en altas velocidades los valores de la vibración son semejantes, aunque ligeramente superiores en altas velocidades (elevador sin carrocería) y no superan el umbral aviso, motivo por el que no se ha generado ningún aviso.

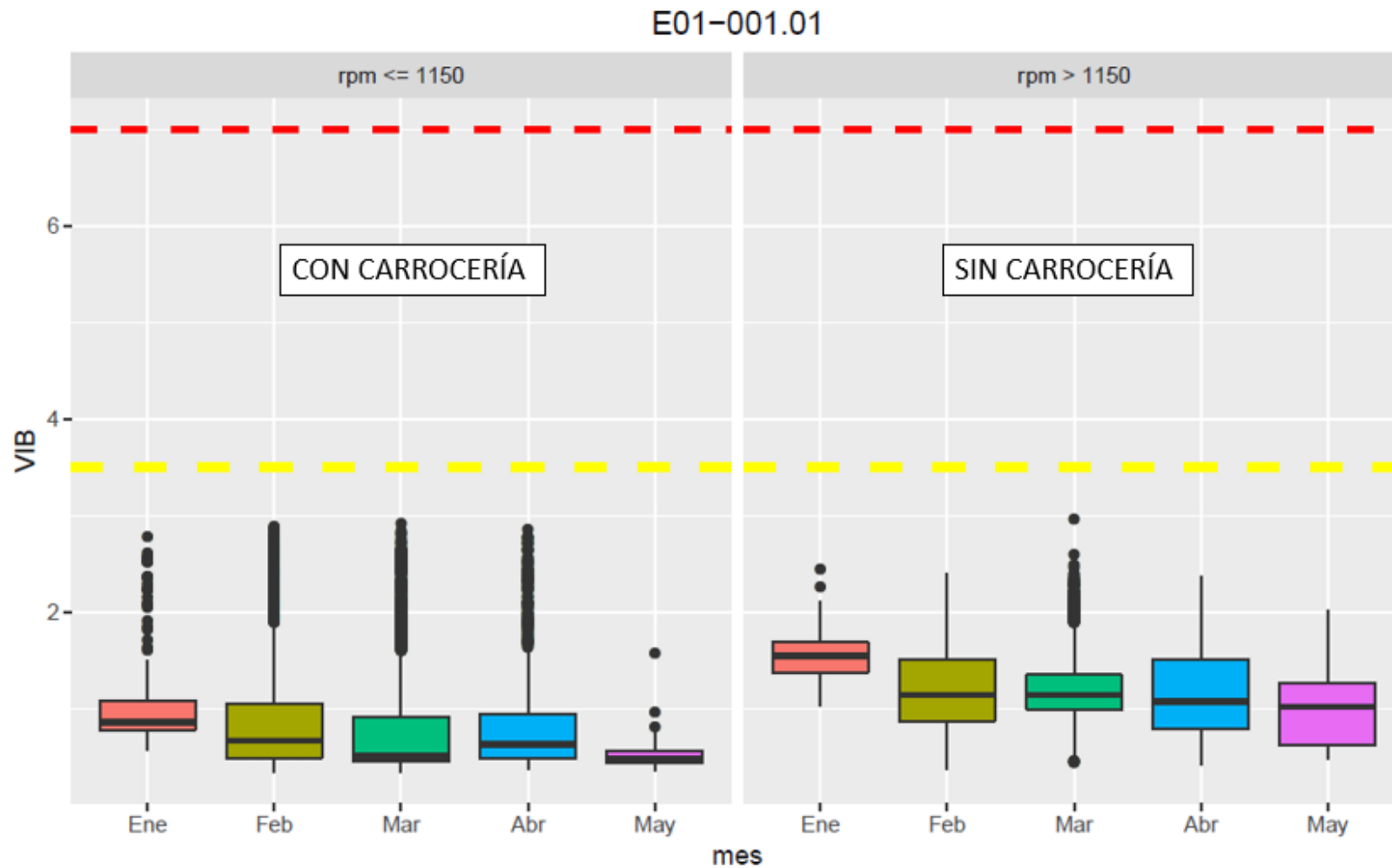


Figura 41. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 1.

En la siguiente imagen se puede ver la evolución del valor de la variable VIB a lo largo del periodo de estudio en el punto 16 (lado motriz del elevador 2 hasta abril), representado mediante un diagrama de cajas. En este caso tanto para bajas como para altas velocidades se supera el umbral aviso. Sin embargo, es en altas velocidades donde se supera este umbral en todas las etapas. Esto es debido a que este elevador a altas velocidades sube cargado y además este elemento se encuentra en voladizo.

En el mes de abril este punto deja de formar parte del lado motriz, sin embargo, en el mes de mayo se observan unos valores de vibración más elevados a pesar de no tener actividad. Este comportamiento podría deberse a una vibración en la estructura que detecta este sensor. Además, hay que recordar que este punto se encuentra en voladizo y al no estar acoplado tiene mayor grado de libertad, hecho que puede provocar mayor vibración.

Sin embargo, hay que realizar seguimiento en este punto para comprobar que efectivamente las vibraciones altas observadas en el mes de mayo se deben a una vibración de la estructura y no a un fallo incipiente en este elemento.

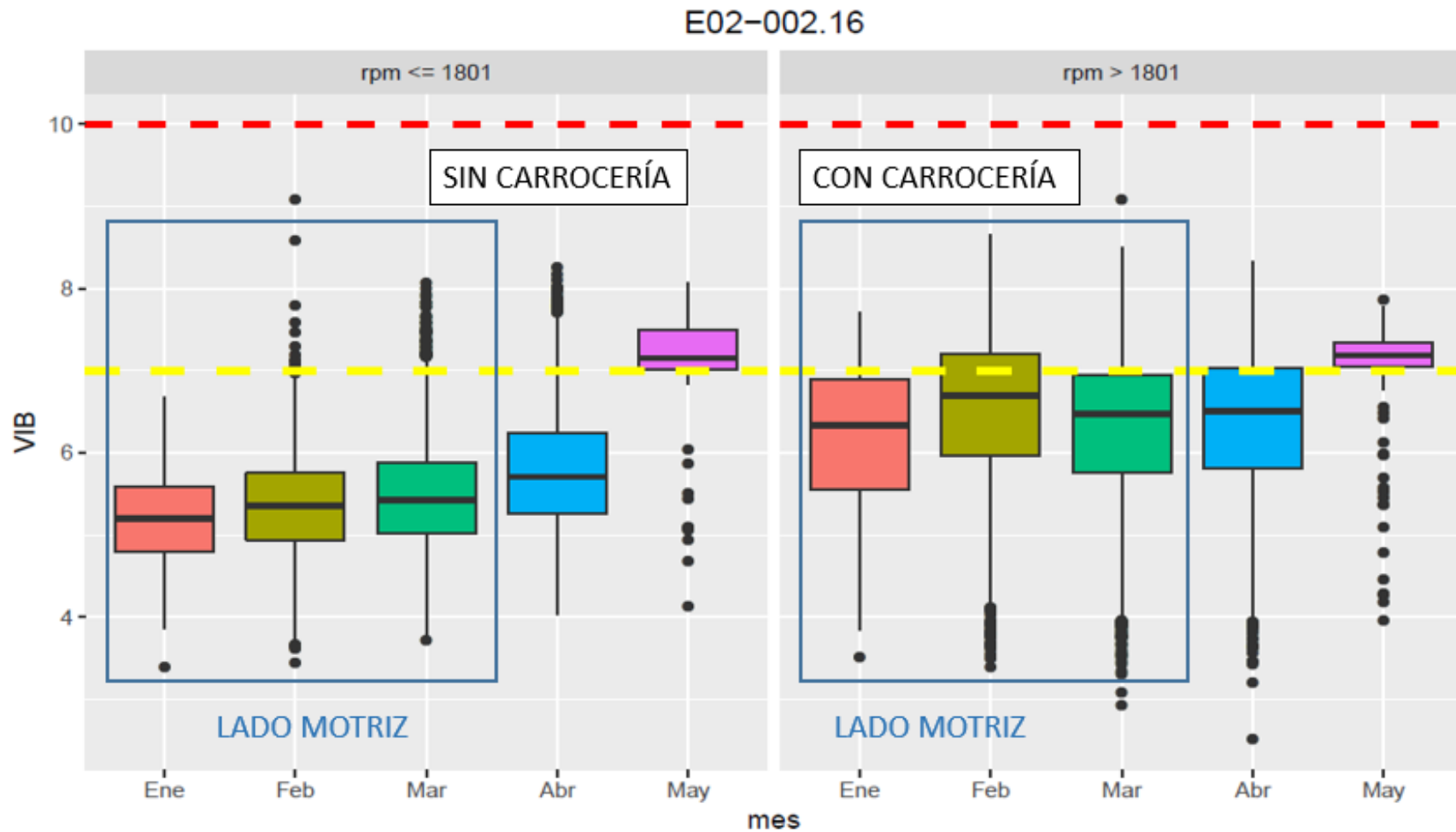


Figura 42. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 16.

En la siguiente imagen se puede ver la evolución del valor de la variable VIB a lo largo del periodo de estudio en el punto 9 (lado motriz del elevador 2 a partir de abril), representado mediante un diagrama de cajas. Al igual que en el punto 1 se observan valores de la vibración no muy dispersos y en todo el periodo inferiores al umbral aviso. Para bajas velocidades los valores son ligeramente superiores y esto se observa muy bien a partir del mes de abril en el que se acopla este motor, pasando a formar parte del lado motriz del elevador 2. Por el contrario, en altas velocidades a partir del mes de abril se produce un descenso en los valores de VIB. Este hecho es contradictorio debido a que a altas velocidades este elevador sube cargado, lo que generaría mayor vibración, sin embargo, este comportamiento podría deberse a que justamente debido a la carga el movimiento tenga menor grado de libertad, lo que genera que disminuya ligeramente la vibración cuando el elevador va cargado.

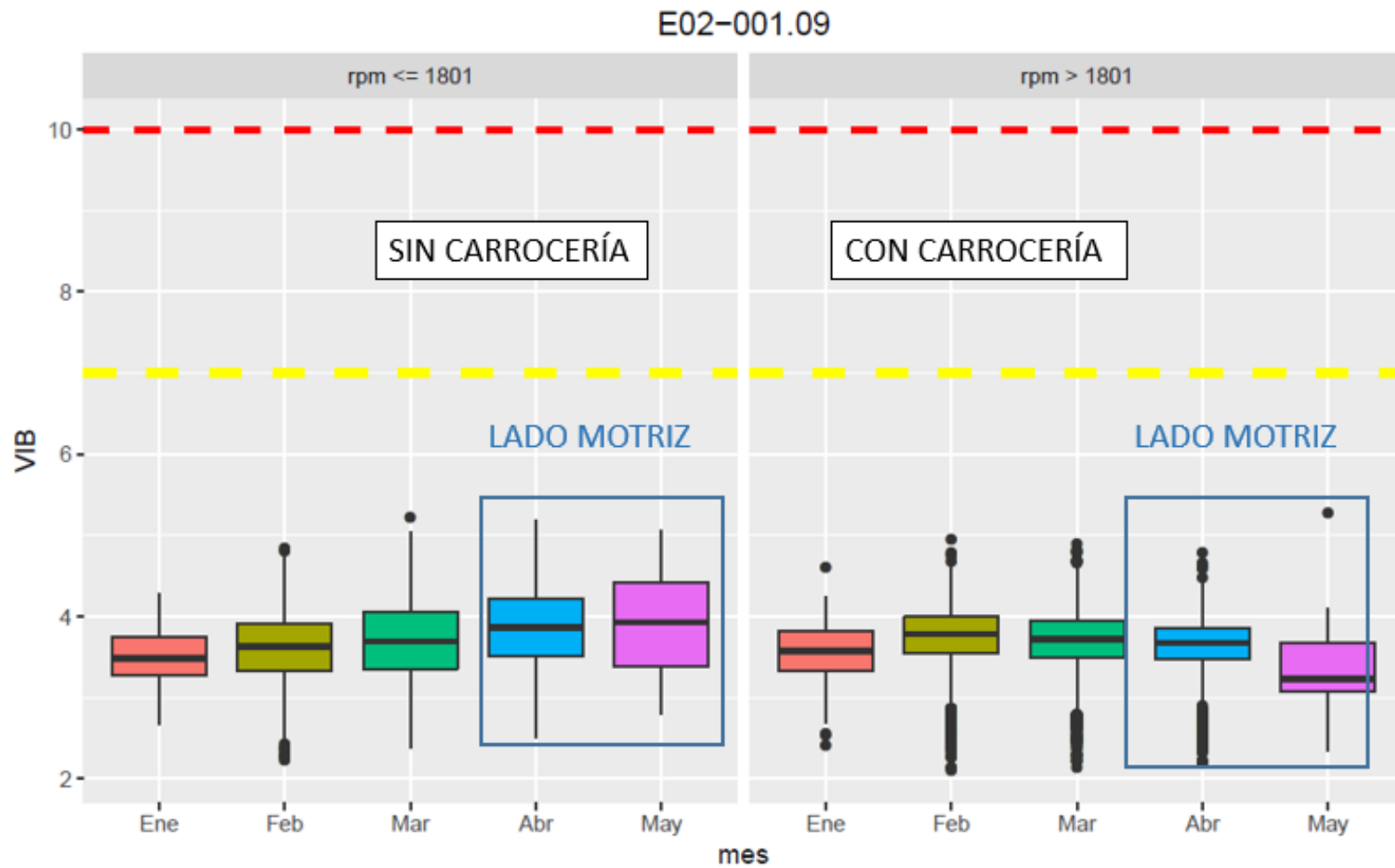


Figura 43. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 9.

Realizando una comparación entre los elementos homólogos de ambos elevadores, punto 1 – punto 16 (lado motriz del elevador 2 hasta abril) y punto 1 – punto 9 (lado motriz del elevador 2 a partir de abril), respectivamente, con respecto a los valores obtenidos de la variable VIB, se observa lo siguiente:

- En el punto 1 se obtienen unos valores de vibración inferiores a 2 (mm/s^2), en el punto 9 los valores obtenidos se encuentran entre 3 – 5 (mm/s^2) y en el punto 16 entre 5 – 8 (mm/s^2). En este caso, el hecho de que los motores del elevador 2 estén en voladizo sí que influyen en el comportamiento de la vibración, siendo esta más alta en comparación con la obtenida en el elevador 1. Posiblemente la antigüedad del elevador también contribuya a este resultado.

Para observar el comportamiento de los puntos restantes, representado mediante un diagrama de cajas, ver [ANEXO C. DIAGRAMAS DE CAJAS.](#)

La matriz de gráfico de dispersión es una herramienta que ayuda a identificar la posible relación entre dos variables, la representa de forma gráfica y permite calcular el coeficiente de correlación y su signo. En el triángulo inferior de los gráficos se muestran las relaciones entre variables indicando una aproximación polinomial a su naturaleza. En la diagonal se representa el histograma de cada variable y, en el triángulo superior, el valor absoluto de las correlaciones.

En las matrices de gráfico de dispersión de la Figura 41 y Figura 42, se han representado las relaciones que existen entre las variables y las mediciones realizadas por el sensor instalado en el punto 1 del elevador 1 y el sensor instalado en el punto 9 del elevador 2, respectivamente.

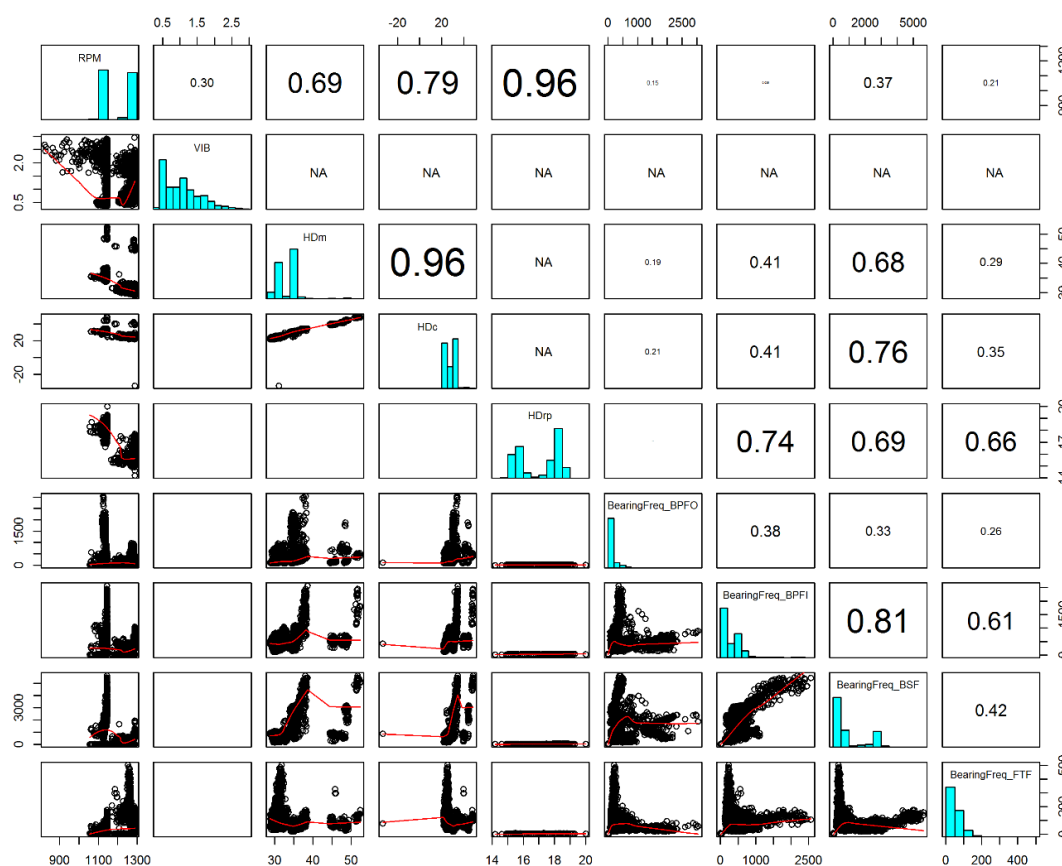


Figura 44. Relaciones entre las variables disponibles para el sensor 1 del elevador 1.

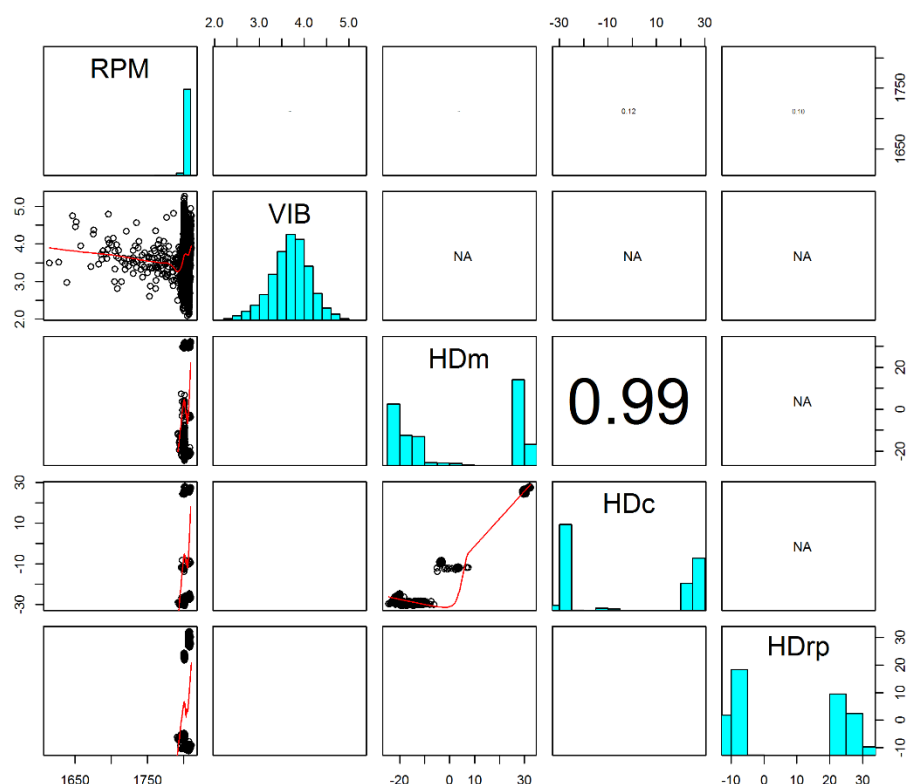


Figura 45. Relaciones entre las variables disponibles para el sensor 9 del elevador 2.

En primer lugar, lo que se observa es que no es posible visualizar ningún tipo de relación entre algunas de las variables analizadas (valores NA en las correlaciones). Esto se debe a que el sistema instalado no toma todas las medidas en el mismo instante, sino que lo realiza de forma secuencial. Es importante notar que esta situación se produce en todos los sensores analizados.

Por ello, para poder realizar un mejor análisis, en lugar de utilizar los valores instantáneos, se agrupan las distintas mediciones en ventanas temporales. Así, se han analizado ventanas de tiempo de 2, 3, 5 y 10 segundos. A modo de ejemplo, en la Tabla 8 y Tabla 9 se presenta el número de valores disponibles en cada ventana temporal para los elementos 1 y 9 de los elevadores 1 y 2, respectivamente. En estas tablas es posible observar lo siguiente:

- Existe un mayor número de medidas de la vibración en comparación con el resto de las técnicas; esto es más evidente en el elevador 2.

- El número de medidas tomadas en el elevador 2 es inferior al número de medidas tomadas en el elevador 1.
- Existe poca continuidad en la toma de datos de las distintas técnicas. Esto se refleja en que, aunque existe un elevado número de mediciones en cada técnica (cada medición tarda, de promedio, 150 segundos), es necesario ampliar el tamaño de la ventana temporal a 5 o 10 segundos para tener un número aceptable de mediciones de todas las técnicas. La situación es mucho más evidente en el elevador 2, ya que, como se ha comentado previamente, el número de mediciones realizadas es mucho menor que para el elevador 1.

Técnica	Tamaño de la ventana temporal			
	2 s	3 s	5 s	10 s
VIB	13795	13213	8972	4891
HDm	7219	7069	5548	3543
HDc	7219	7069	5548	3543
HDrp	7256	7112	5624	3582
TODAS	1292	3926	4072	2937

Tabla 8. Número de medidas disponibles para el elemento 1 del elevador 1, en función del tamaño de la ventana temporal analizada. Se presentan las distintas variables de forma independiente y en común.

Técnica	Tamaño de la ventana temporal			
	2 s	3 s	5 s	10 s
VIB	10376	10336	7772	4571
HDm	1492	1486	1402	1179
HDc	1492	1486	1402	1179
HDrp	1493	1479	1408	1176
TODAS	11	39	320	401

Tabla 9. Número de medidas disponibles para el elemento 9 del elevador 2, en función del tamaño de la ventana temporal analizada. Se presentan las distintas variables de forma independiente y en común.

Un menor tamaño de ventana temporal permite realizar un mejor estudio de las relaciones existentes entre las distintas variables analizadas, ya que existe una menor variabilidad en los datos, es decir, una menor dispersión en las velocidades, así como en el resto de las variables, permitiendo una mejor comprensión de lo que está sucediendo en los elevadores. Por ello, en los siguientes análisis se ha tomado la información proporcionada por la agrupación obtenida con ventanas temporales de tres segundos en el caso del elevador 1 y cinco segundos en el caso del elevador 2.

La siguiente matriz de gráfico de dispersión representa las relaciones existentes entre las variables agrupadas en una ventana temporal de tres segundos para el punto 1. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se observan dos velocidades de funcionamiento, una en torno a 1150 rpm y otra en torno a 1250-1300 rpm.
- Existe una fuerte correlación positiva entre las variables HDm y HDc. El valor de HDm aumenta a medida que aumenta el valor de HDc, esto se debe a que a medida que empeora el grado de lubricación del elemento, empeora su estado.
- Existe una fuerte correlación negativa entre la velocidad y las técnicas HDm y HDc. A medida que aumenta la velocidad, se reduce el valor de las técnicas HDm y HDc (técnicas que dependen entre otros factores de velocidad y carga). Esto se explica porque el elevador 1 sube a velocidades más elevadas y vacío, lo que implica menores impactos.
- Al aumentar el valor HDm, se reduce el valor de la diferencia entre HDm y HDc, lo que indicaría que no existe daño superficial en el punto 1 del elevador 1 (Morando, 2002).

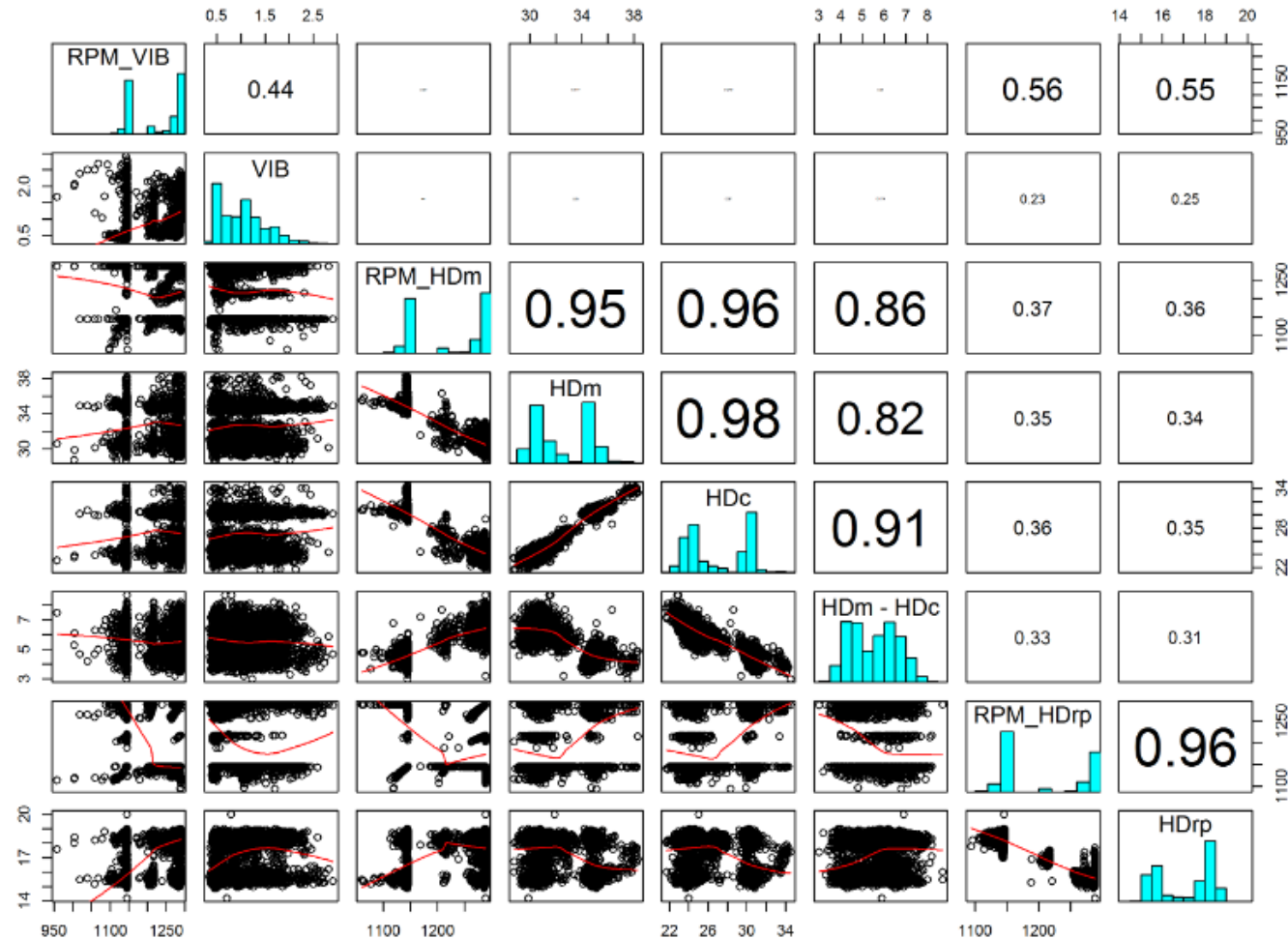


Figura 46. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de tres segundos para el sensor 1 del elevador 1.

Para el resto de los puntos normalizados del elevador 1, el comportamiento obtenido con la información proporcionada por la agrupación en ventanas temporales de tres segundos es distinto al obtenido en este punto. Se observa lo siguiente (ver [ANEXO D. MATRICES DE GRÁFICOS DE DISPERSIÓN.](#))

- En los puntos restantes la única correlación que se establece es entre las variables HDc y HDm-HDc, y es negativa, siendo esta relación obvia ya que al aumentar el valor de HDc disminuye el resultado de la resta entre HDm y HDc. Además, el coeficiente de correlación entre estas variables es alto únicamente en los puntos 4 y 5, en los demás puntos descende su valor. Entre las variables restantes no se consigue establecer relaciones o su coeficiente de correlación es bajo.

La siguiente matriz de gráfico de dispersión representa las relaciones existentes entre las variables agrupadas en una ventana temporal de cinco segundos para el punto 9. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se observan dos velocidades de funcionamiento, pero las diferencias en este caso son menores, y la velocidad de operación es más alta que para el elevador 1, situándose en torno a 1800 rpm.
- Debido al menor número de casos disponibles y a que la ventana temporal es mayor que para el elevador 1, la relación entre la velocidad y las técnicas HDm y HDc no es tan clara. Sin embargo, se observa una tendencia inversa al caso anterior. Es decir, mayores valores en las técnicas HDm y HDc a mayores velocidades. Esto es debido a que este elevador alcanza su velocidad máxima durante la subida (al igual que el elevador 1), pero cargado (a diferencia del elevador 1).

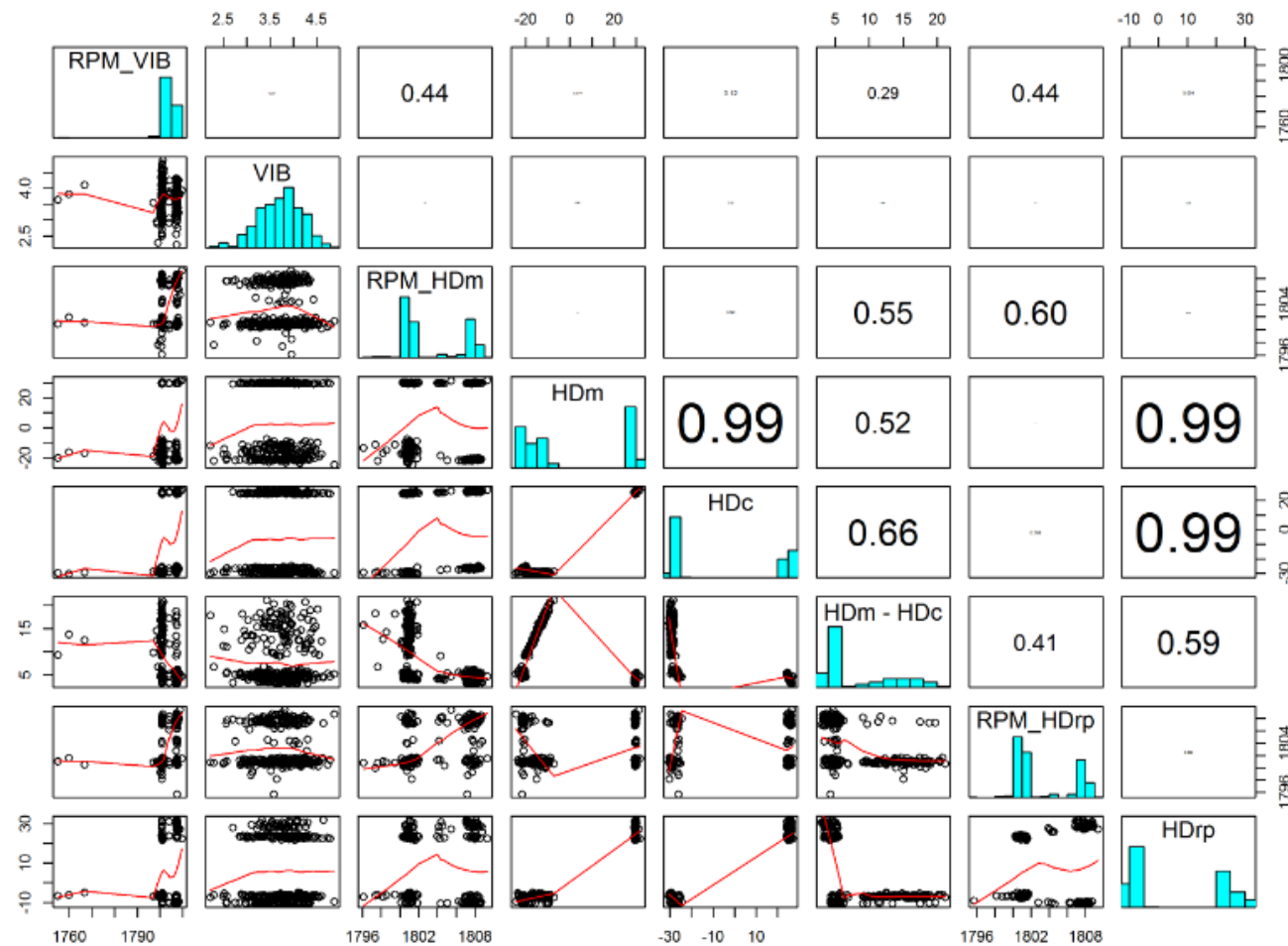


Figura 47. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de cinco segundos para el sensor 9 del elevador 2

Para el resto de los puntos normalizados del elevador 2, el comportamiento obtenido con la información proporcionada por la agrupación en ventanas temporales de cinco segundos es distinto al obtenido en este punto. Se observa lo siguiente (ver [ANEXO D. MATRICES DE GRÁFICOS DE DISPERSIÓN](#)):

- Existe una fuerte correlación positiva entre las variables HDm y HDc únicamente en el punto 16, punto en el que también se puede observar el cambio sufrido al pasar del lado motriz al lado no motriz. También existe una relación negativa entre las variables HDc y HDm-HDc, pero su coeficiente de correlación es bajo. No se observan correlaciones significativas entre las demás variables en este punto.
- En los demás puntos existe una relación negativa entre las variables HDc y HDm-HDc, pero su coeficiente de correlación es bajo.

7. CONCLUSIONES

Llegados a este punto y tras el análisis realizado, se procede a presentar las principales conclusiones que se han podido establecer a partir de los resultados obtenidos:

- El elevador 1, realiza un movimiento de bajada a baja velocidad y cargado. Con estas condiciones se observan altos valores de la técnica HDm y valores inferiores de la técnica VIB. El movimiento de subida lo realiza a altas velocidades y vacío, y en este caso se observan valores inferiores de la técnica HDm y mayores valores de la técnica VIB. No se han podido sacar conclusiones para los movimientos a baja velocidad y sin carga, ni para los movimientos a alta velocidad y cargados debido a la dificultad de clasificar los datos obtenidos por velocidades (ver figura 48).
- El elevador 2, realiza un movimiento de bajada a baja velocidad, pero sin carga. Con estas condiciones se observan bajos valores de la técnica HDm y valores superiores de la técnica VIB. El movimiento de subida se realiza a altas velocidades y cargado, y en este caso se observan valores superiores de la técnica HDm y valores menores de la técnica VIB. Estas conclusiones son distintas para el punto 16. No se han podido sacar conclusiones para los movimientos a baja velocidad y con carga, ni para los movimientos a alta velocidad y vacíos debido a la dificultad de clasificar los datos obtenidos por velocidades (ver figura 48).
- Desde el punto de vista de la técnica HDm, no se observan mayores diferencias entre el elevador 1 y el elevador 2, incluso el elevador 1 alcanza valores de esta técnica ligeramente superiores. Por lo tanto, se puede concluir que no influye la antigüedad del elevador ni el hecho de que esté en voladizo en los resultados obtenidos con esta técnica.
- Desde el punto de vista de la técnica VIB, sí que se observa un aumento de la vibración en los puntos que se encuentran en voladizo del elevador 2, en comparación con los del elevador 1. Esto se puede

deber a la antigüedad de este elevador además del hecho de que estos puntos están en voladizo, como ya se ha comentado.

- La presencia de carga genera valores superiores de la técnica HDm, es decir mayores impactos. Este hecho ocurre en todos los puntos de ambos elevadores (ver figura 48).
- Sin embargo, es la ausencia de la carga la que genera valores superiores de la técnica VIB, es decir mayores vibraciones. Esto podría deberse a que la ausencia de carga permite mayor grado de libertad del movimiento, lo que generaría mayor vibración. Este hecho ocurre en todos los puntos de ambos elevadores (ver figura 48), excepto el punto 16, en el que la presencia de la carga genera mayor vibración, hecho que podría deberse a un fallo incipiente en este punto (ver figura 48).

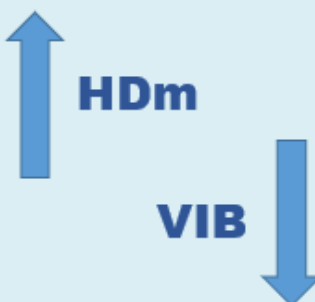




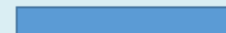
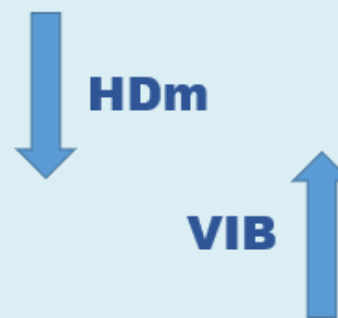



CARGA	ELEVADOR 1 Nuevo (2018) No voladizo		ELEVADOR 2 Antiguo (2011) Voladizo	
	BAJA VELOCIDAD-LADO MOTRIZ	ALTA VELOCIDAD-LADO MOTRIZ	BAJA VELOCIDAD-LADO MOTRIZ	ALTA VELOCIDAD-LADO MOTRIZ
CON CARROCERÍA				9 
				16 
SIN CARROCERÍA			9 	
			16 	

Figura 48. Conclusiones comportamiento elevadores.

Hay que resaltar la importancia de llevar a cabo un seguimiento del comportamiento del punto 16 en todas las técnicas, para descubrir si lo que ocurre es un fallo incipiente y puede evolucionar hacia una avería grave o se trata de un comportamiento normal. Además, según discorra este comportamiento se podrá evaluar la posibilidad de modificar la frecuencia y las acciones del plan de mantenimiento de estos elevadores.

A continuación, se añaden las principales ventajas y desventajas observadas en este sistema:

Ventajas:

- Este tipo de implementación es un método de mantenimiento predictivo eficaz y rentable a largo plazo, que permite detectar precozmente los daños en los elementos estudiados y su grado de lubricación, actuando con antelación y reduciendo así los costes de mantenimiento.
- Permite aumentar la disponibilidad de los equipos, lo que conlleva un incremento de la producción.
- Se trata de un método accesible, que tras una formación básica permite manejarlo sin dificultades. Además, al ser un sistema de monitorizado en continuo y de gran versatilidad, es posible estudiar y agrupar las variables según se desea.

Desventajas:

- Inversión inicial elevada.
- Los sensores detectan las vibraciones e impactos de todo tipo, sin poder distinguir con exactitud si estos se deben al movimiento de la estructura que soporta los elementos, o al comportamiento normal del elemento. Sin embargo, este problema se soluciona realizando el seguimiento de los puntos en los que se sospecha un comportamiento anómalo.
- La necesidad de normalizar los puntos, definiendo el diámetro y las características del rodamiento, podría dificultar el proceso debido a que en ocasiones no se dispone de toda la información y sería necesario

contactar con los fabricantes de estos elementos, retrasando así la toma de datos fiables.

Para finalizar este estudio es importante destacar que los resultados obtenidos son escasos en comparación con lo que podría ofrecer esta metodología, debido a que esta técnica de medición es más efectiva en sistemas mecánicos más complejos como podrían ser las turbinas de vapor que trabajan a más revoluciones. No obstante, a largo plazo, continuando con el seguimiento, y aprovechando las opciones que ofrece esta herramienta se esperan resultados más esclarecedores.

Se puede concluir confirmando que a pesar de las desventajas y tras la puesta en marcha y seguimiento, se han observado los beneficios de la implementación de este sistema, como la detección de comportamientos anómalos que permite una rápida actuación si es necesario, motivo por el que se afirma que se han cumplido los objetivos establecidos en el presente TFG.

BIBLIOGRAFÍA

- CND. *Impulsos de Choque SPM* [en línea]. Disponible en: <http://www.controlnoestructivo.com/impulsos-choque.php> [Consulta: 31 enero 2019]
- Prieto, M.R. *Vibraciones de Máquinas Rotativas; Análisis de Órdenes*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2017.
- Sundström, T. *An introduction to the SPM HD Method*. R&D, SPM Instrument AB, 2010.
- Sundström, T. *The Shock Pulse Method and the Four Failure Stages of Rolling Element Bearings*. R&D, SPM Instrument AB, 2013.
- Sundström, T; y Hedin, L. *An introduction to HD ENV*. R&D, SPM Instrument AB, 2015.
- ISO 10817-1, “Sistemas de medida de vibración en ejes rotativos, Parte 1: Señal relativa y absoluta de la vibración radial de ejes rotativos”.
- Pintor Borobia, J.M. *Vibraciones en máquinas. Mantenimiento predictivo*. Universidad de Navarra. Disponible en: http://imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/assignaturas/emyv/pdfdoc/vib/vib_predictivo.pdf [Consulta: 14 de marzo de 2019]
- Morando, L. (2007). Measuring Shock Pulse – another approach to Front Line C Condition Monitoring. SPM Instrument Inc. Recuperado de: https://reliabilityweb.com/articles/entry/measuring_shock_pulse_another_approach_to_front_line_condition_monitor

**Monitorización de un elevador industrial y
análisis de su estado en función de las
vibraciones de sus componentes
mecánicos**

ANEXOS

AUTOR: Lavinia Constanta Giurca

ANEXO A. PLAN DE MANTENIMIENTO

A continuación, se muestran el resto de las tareas preventivas de tipo mecánico que se realizan en estos equipos. Tienen menor influencia en la prevención de daños causados por vibraciones. Están clasificadas según la frecuencia y elemento en concreto:

- Cada tres meses:
 - Columnas de elevación:
 - Revisar el correcto estado de todas las soldaduras a lo largo de las columnas.
 - Comprobar la existencia de grietas a lo largo de las columnas y en soldaduras.
- Cada seis meses:
 - Sistema tracción- Bandas:
 - Verificar el estado de las bandas.
 - Limpiar banda por la parte interior de contacto con el tambor.
 - Comprobar si existe deslizamiento de las bandas sobre el tambor.
 - Verificar el estado de la cinta en la zona de amarre de la misma.
 - Poner una marca para comprobar si existe deslizamiento o elongación o si la cinta está rasgada.
 - Verificar el correcto apriete de los tornillos de fijación- apretar en cruz.
- Cada doce meses:
 - Contrapeso:
 - Verificar el apriete de los tornillos de fijación de la banda – apretar en cruz.
- Cada doce meses:
 - Anclaje manual:

- Comprobar bulón y fijación del sistema de anclaje manual (perno corredizo).
- Cada doce meses:
 - Carro elevación-Deslizamiento:
 - Soltar las ruedas de deslizamiento y comprobar el correcto estado de las ruedas, el eje y el rodamiento (cojinetes) y cambiarlos si es necesario.
 - Comprobar el correcto apriete de los tornillos de los soportes de las ruedas de deslizamiento y reapretar si es necesario.
 - Revisar las soldaduras de la estructura del carro.
 - Comprobar que las ruedas están centradas.
 - Realizar la limpieza de las ruedas de deslizamiento.
 - Revisar la barandilla de seguridad de puertas abiertas y comprobar el correcto apriete de sus tornillos (reapretar si es necesario).
 - Revisar ejes y pasadores de balanza de sujeción a la cinta.
 - Realizar el engrase del eje tensor.
 - Revisar muelle-goma, tuercas y pasadores.
 - Carro elevación - Punto unión:
 - Revisar ejes y pasadores de balanza de sujeción a la cinta.
 - Realizar el engrase del eje tensor (perno-casquillo).
 - Revisar muelle-gomas, tuercas y pasadores.
 - Comprobar el correcto estado de las bandas en la zona de amarre y su correcta tensión.
 - Verificar el correcto apriete de todos los tornillos reapretar si es necesario.
 - Sistema tracción- Tambor:
 - Verificar las soldaduras en todas sus costuras.

- Verificar la homogeneidad de la superficie del tambor (estado de desgaste).
- Realizar la limpieza de la superficie del tambor.
- Comprobar el correcto apriete de los tornillos de los cojinetes y reapretar si es necesario.
- Anualmente:
 - Contrapeso:
 - Comprobar el estado de las ruedas de deslizamiento.
 - Comprobar el estado de los rodamientos.
 - Reapretar tornillos de soporte de las rudas-rodamientos si es necesario.
 - Comprobar el estado de las soldaduras en todas sus costuras.
 - Comprobar soldadura del eje amarre banda.
- Anualmente:
 - Columnas de elevación:
 - Comprobar tornillos de la base y reapretar si es necesario.
 - Comprobar tornillería de la bancada y reapretar si es necesario.
 - Comprobar anclaje parte superior e intermedios y reapretar si es necesario.
 - Comprobar el correcto apriete de los tornillos del soporte de los topes de seguridad y reapretar si es necesario.
 - Verificar el correcto estado de la goma de los topes de seguridad.
- Anualmente:
 - Carro elevación-Amarre mesa:
 - Comprobar el correcto apriete de todos los tornillos y reapretar si es necesario.
 - Verificar soldaduras amarre a mesa y a carro de elevación.

ANEXO B. TENDENCIAS VIB, HDm y HDc.

A continuación, se introducen unas gráficas que representan el comportamiento de la tendencia VIB en los puntos normalizados restantes:

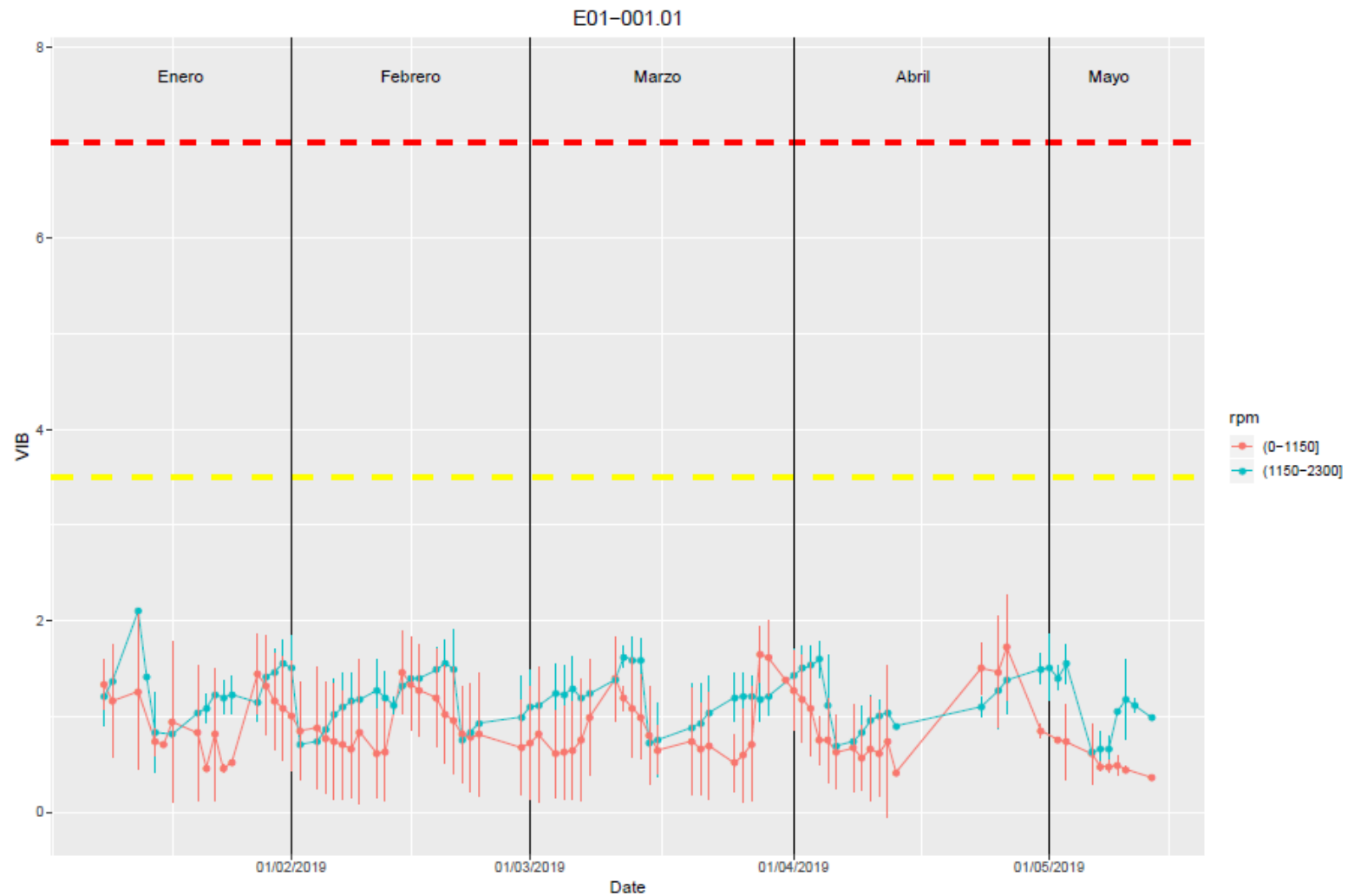


Figura 49. Tendencia VIB punto 1.

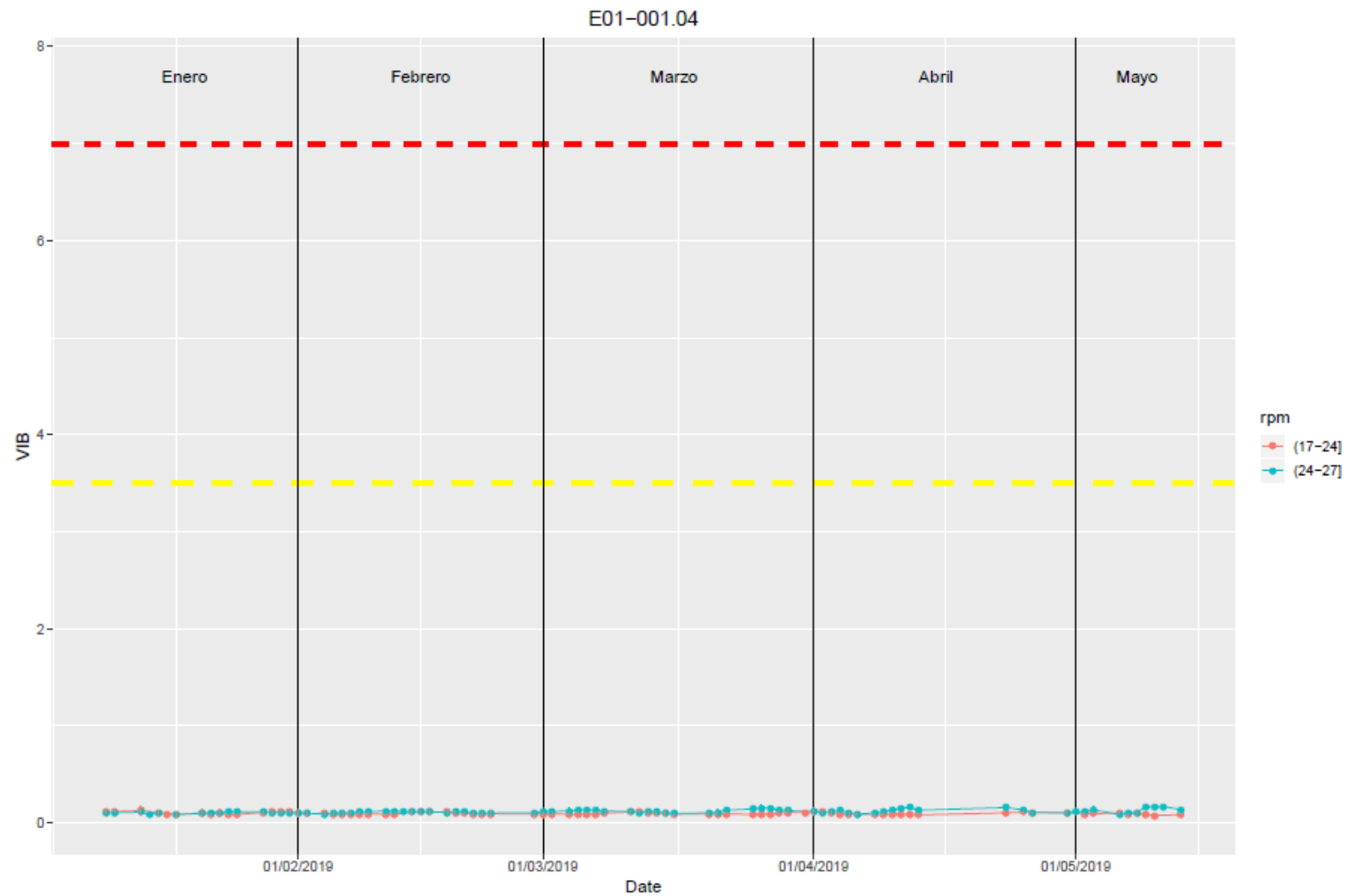


Figura 50. Tendencia VIB punto 4.

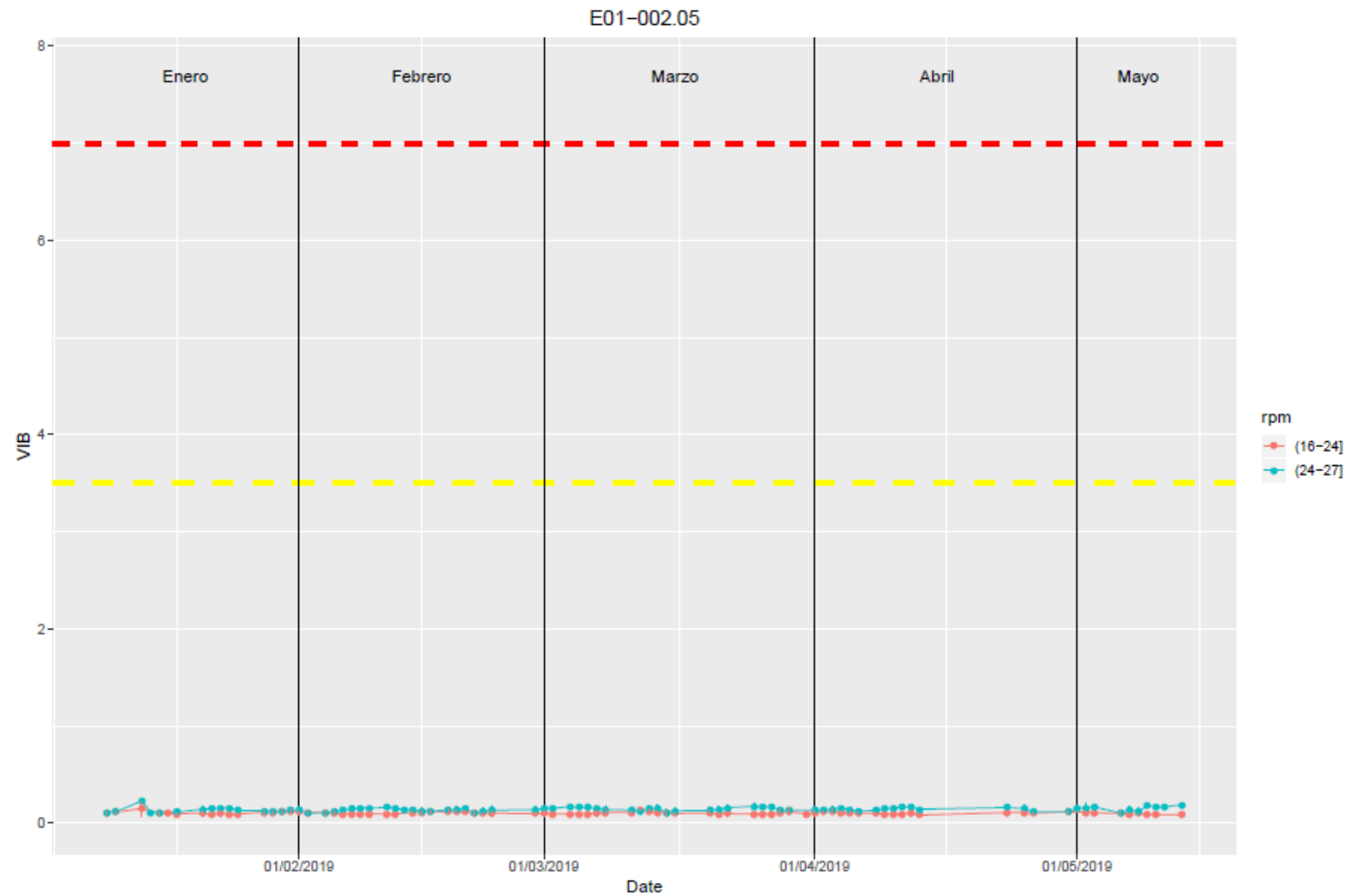


Figura 51. Tendencia VIB punto 5.

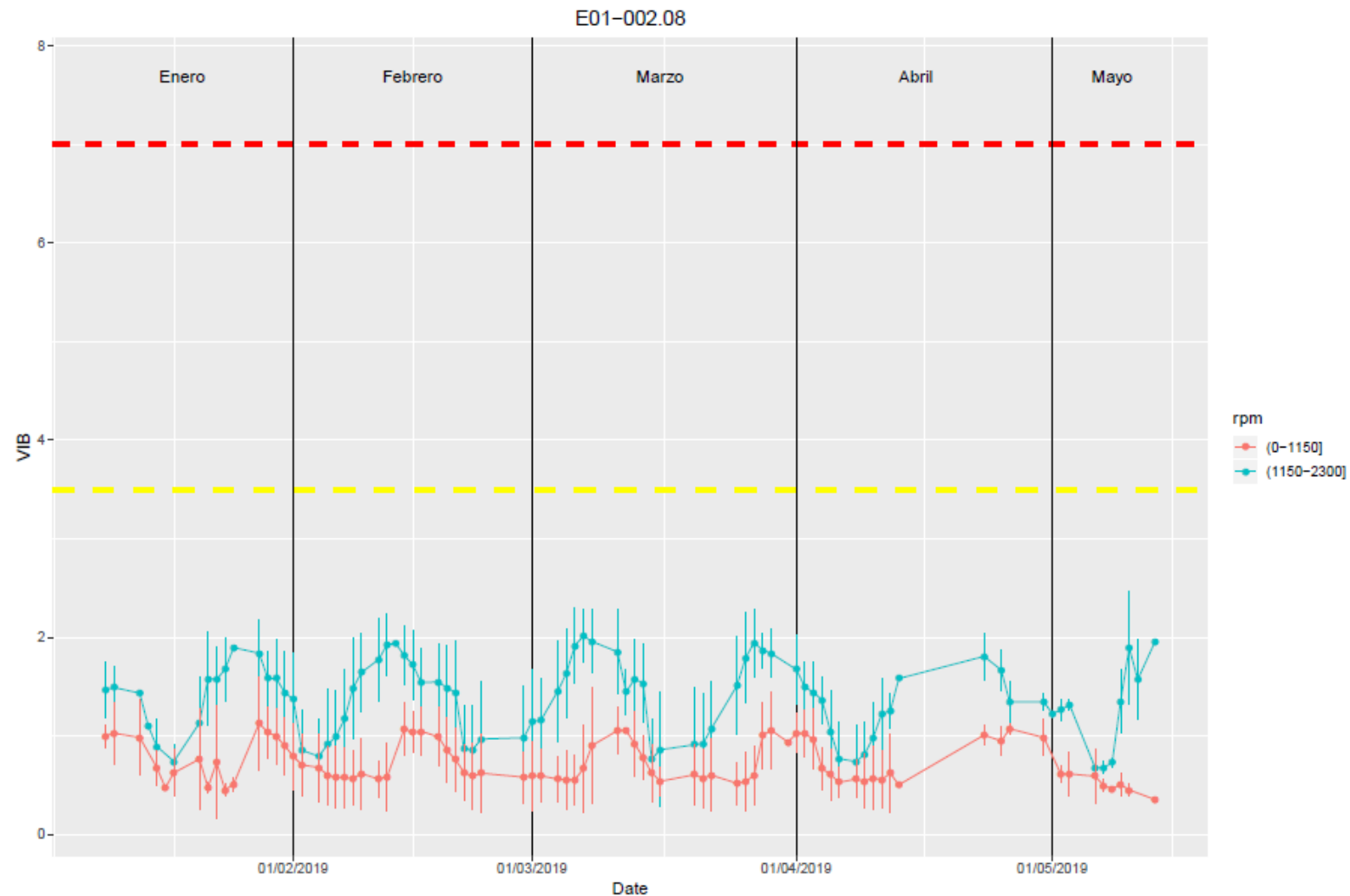


Figura 52. Tendencia VIB punto 8.

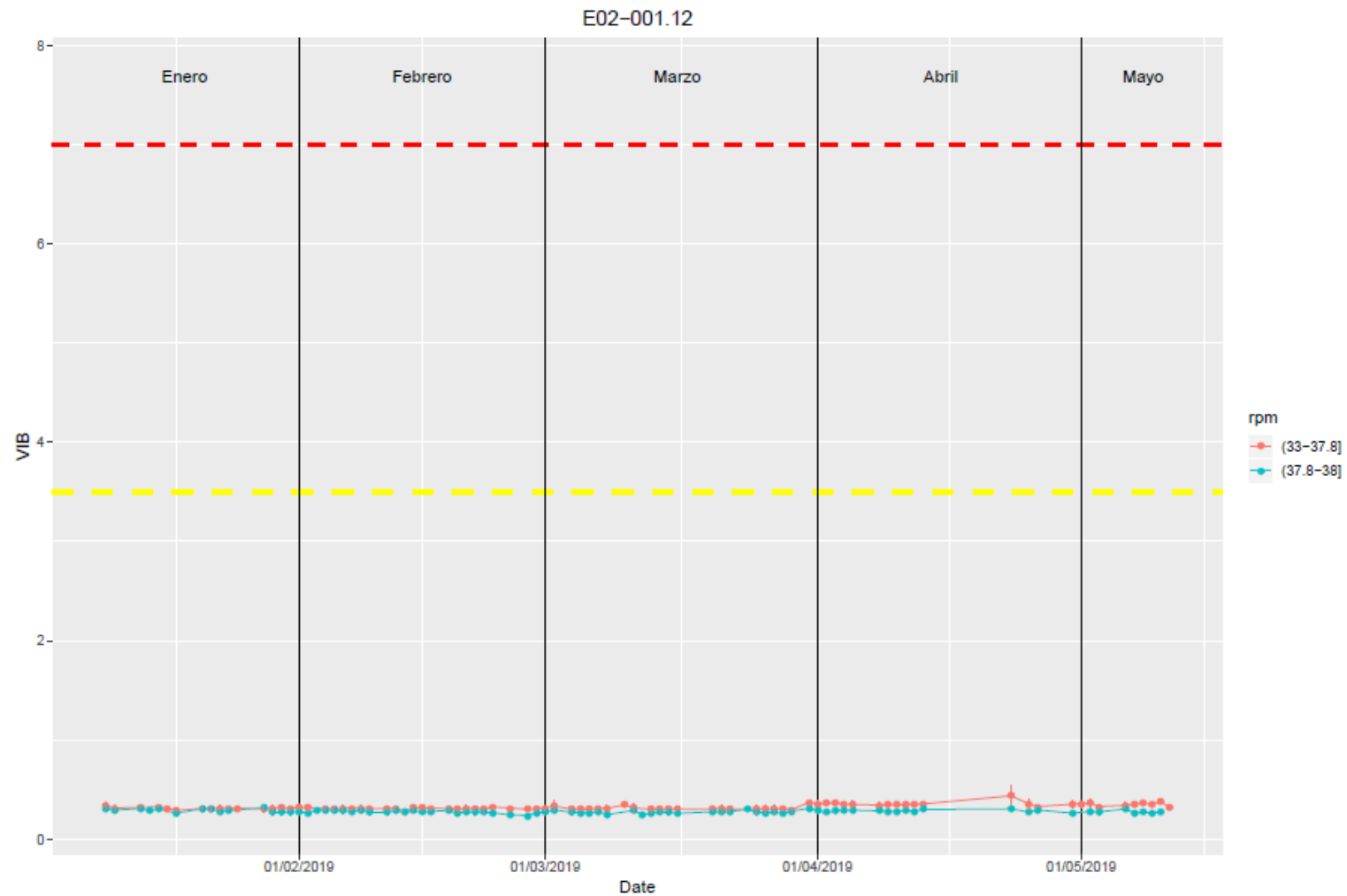


Figura 53. Tendencia VIB punto 12.

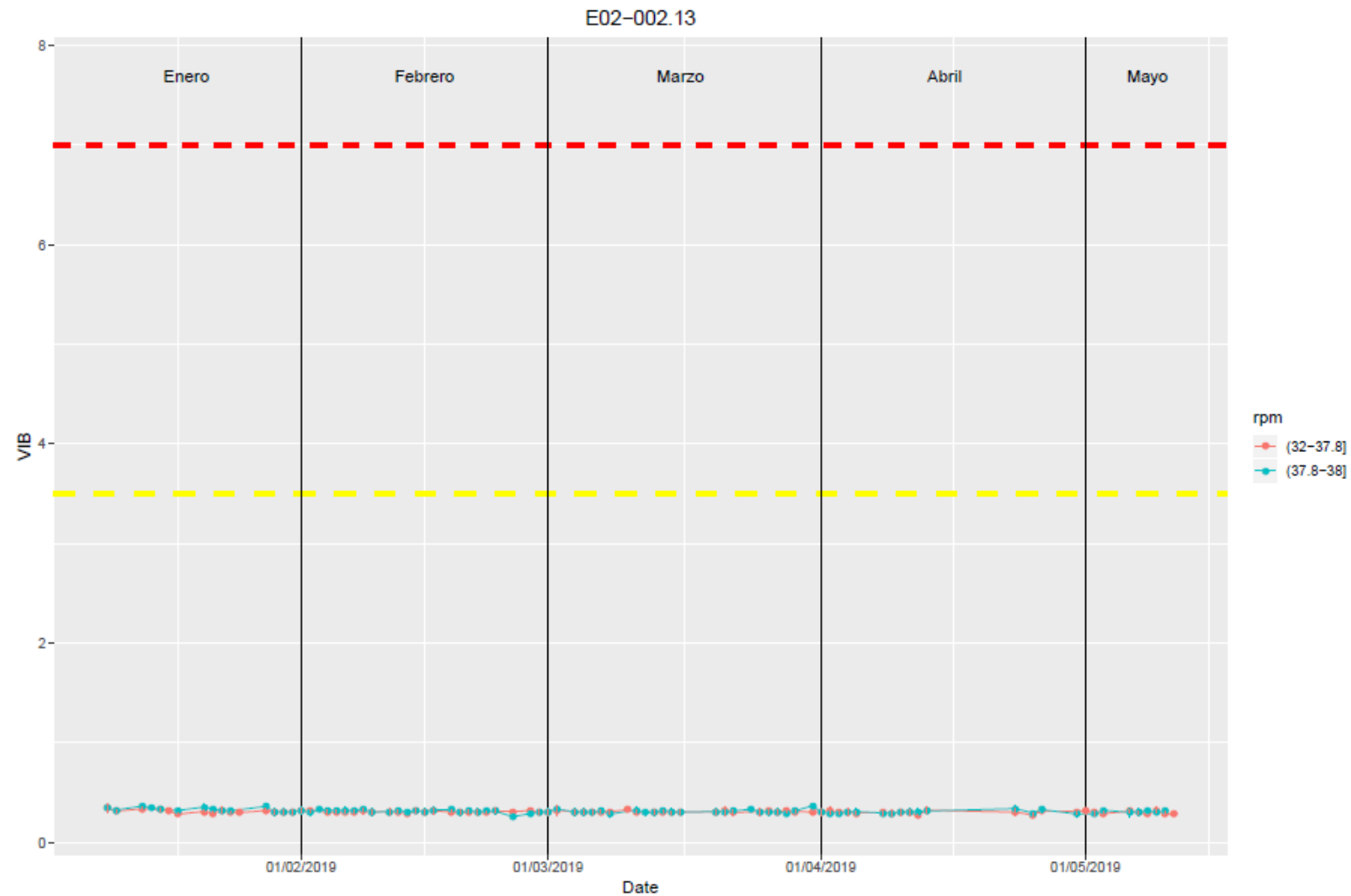


Figura 54. Tendencia VIB punto 13.

A continuación, se introducen unas gráficas que representan el comportamiento de la tendencia HDm en los puntos normalizados restantes:



Figura 55. Tendencia HDm punto 5.

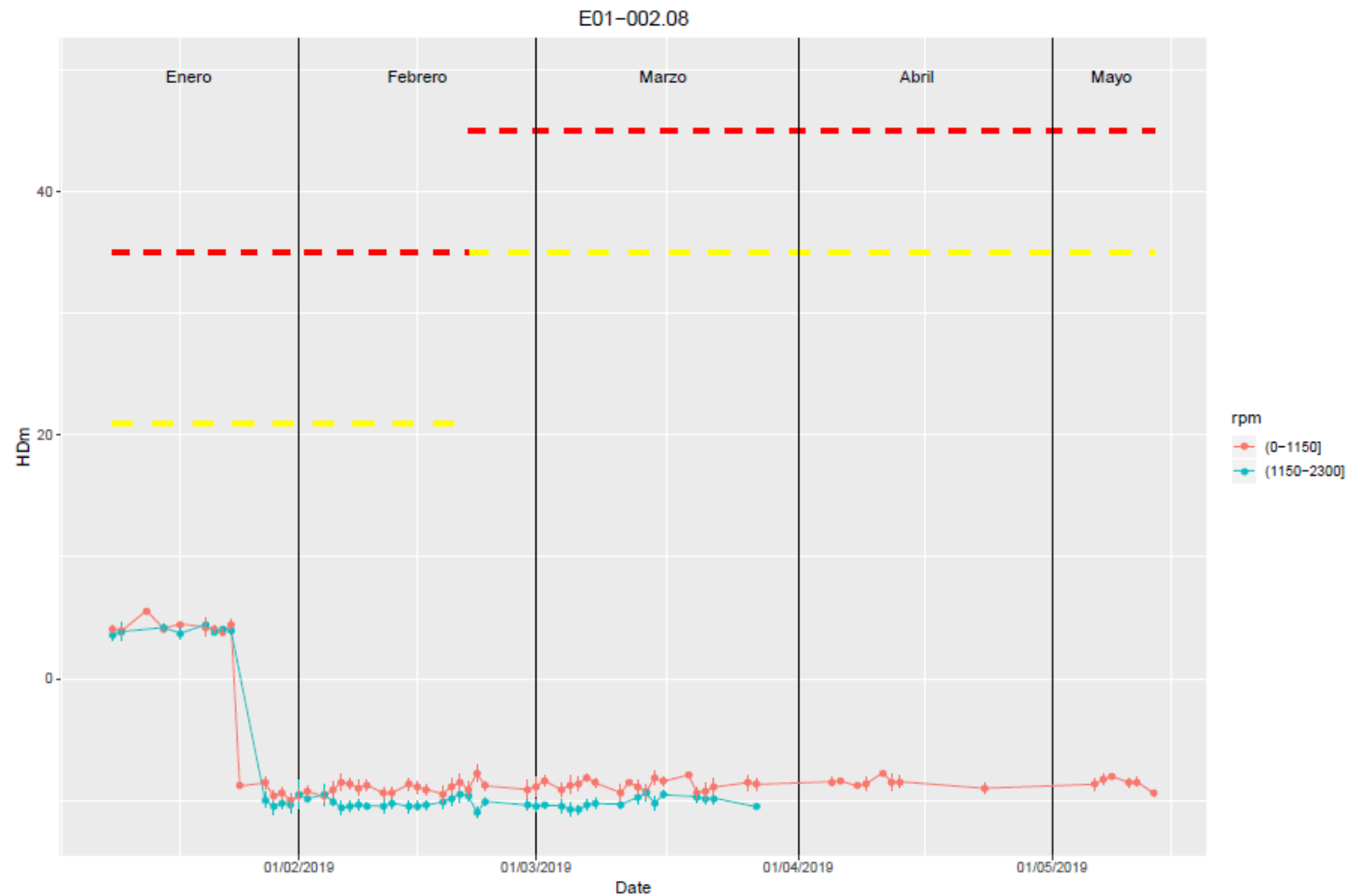


Figura 56. Tendencia HDm punto 8.

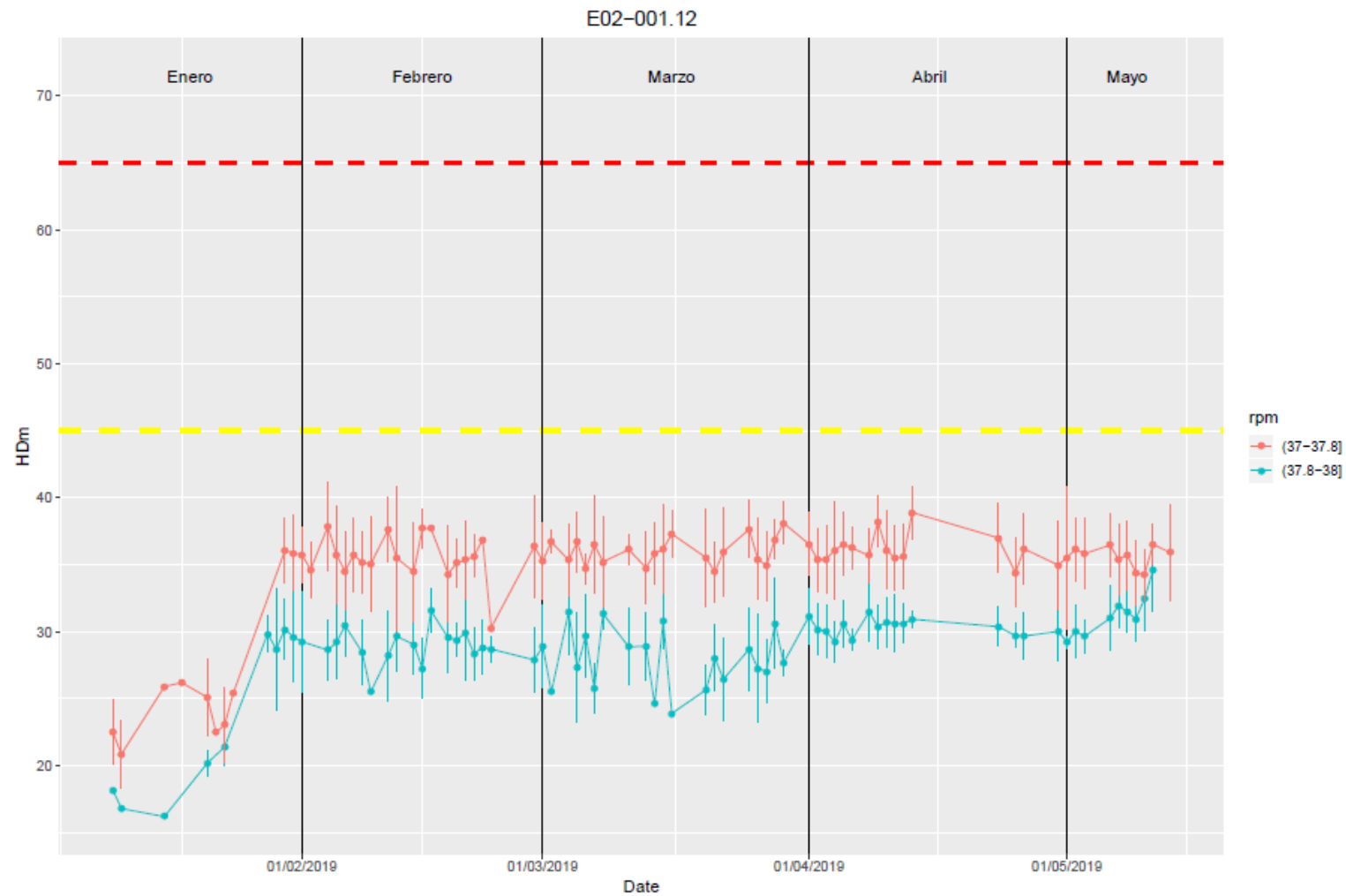


Figura 57. Tendencia HDm punto 12.

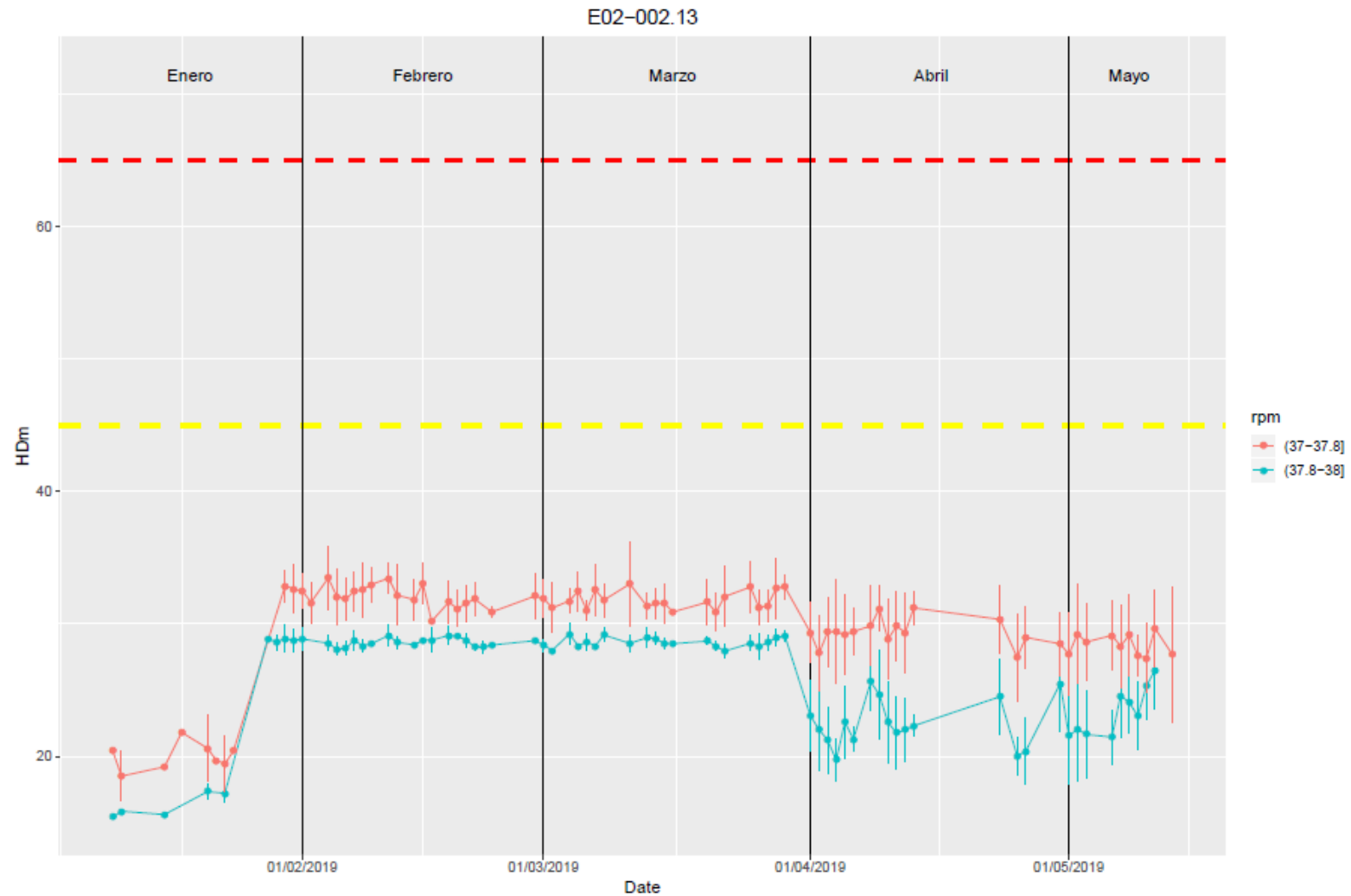


Figura 58. Tendencia HDm punto 13.

A continuación, se introducen unas gráficas que representan el
comportamiento de la tendencia HDc en los puntos normalizados restantes:

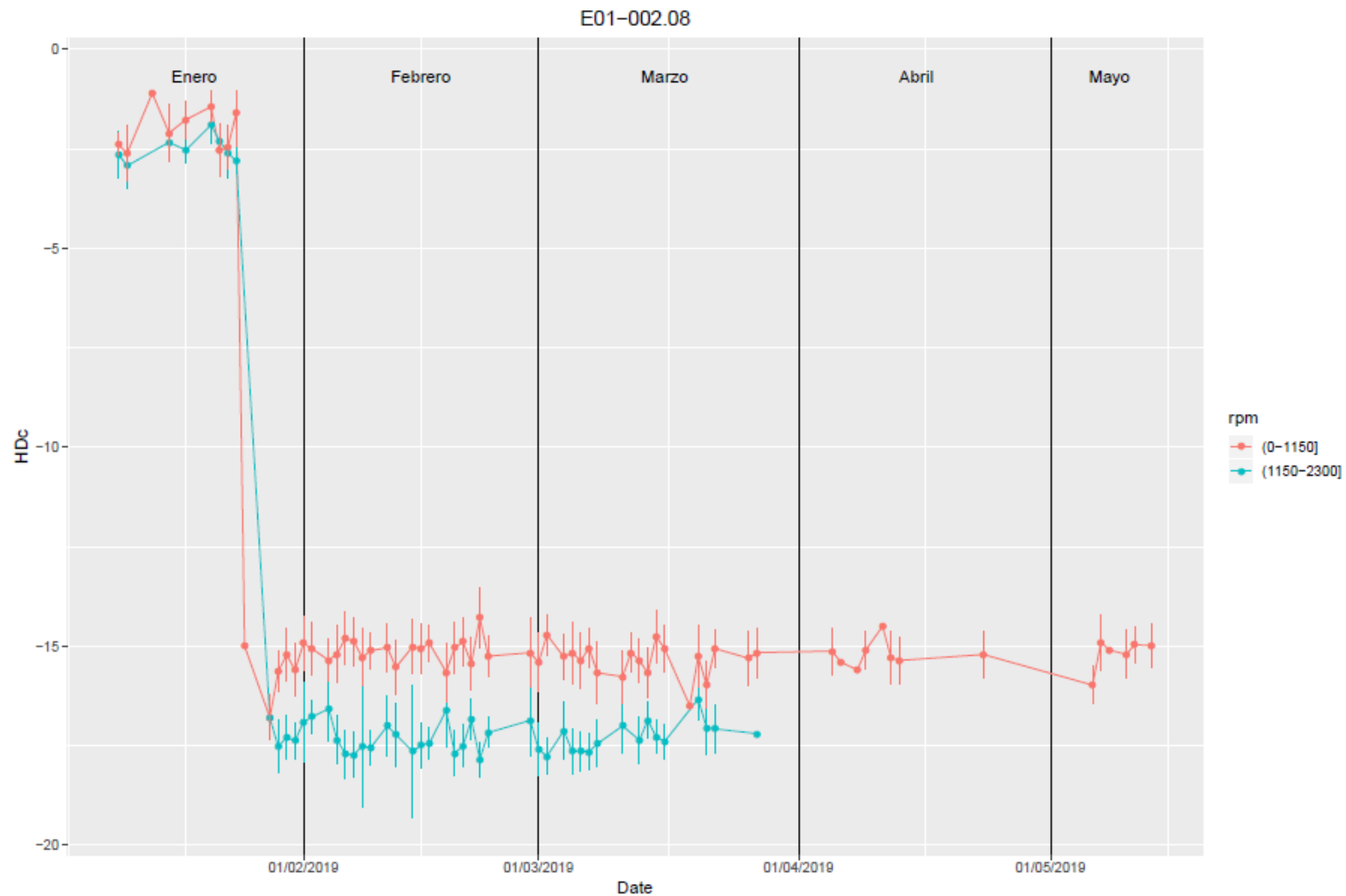


Figura 69. Tendencia HDc punto 8.

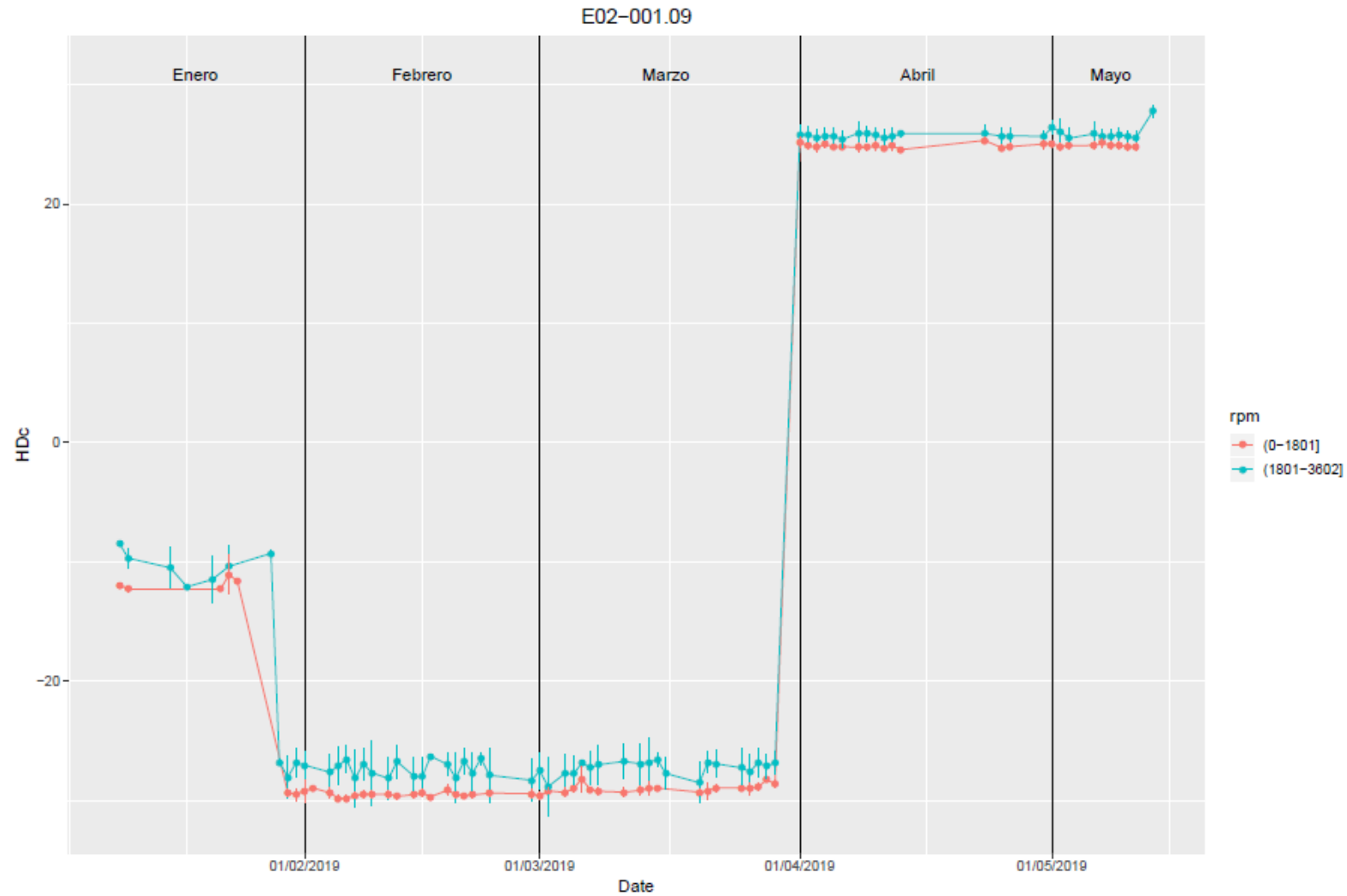


Figura 60. Tendencia HDc punto 9.

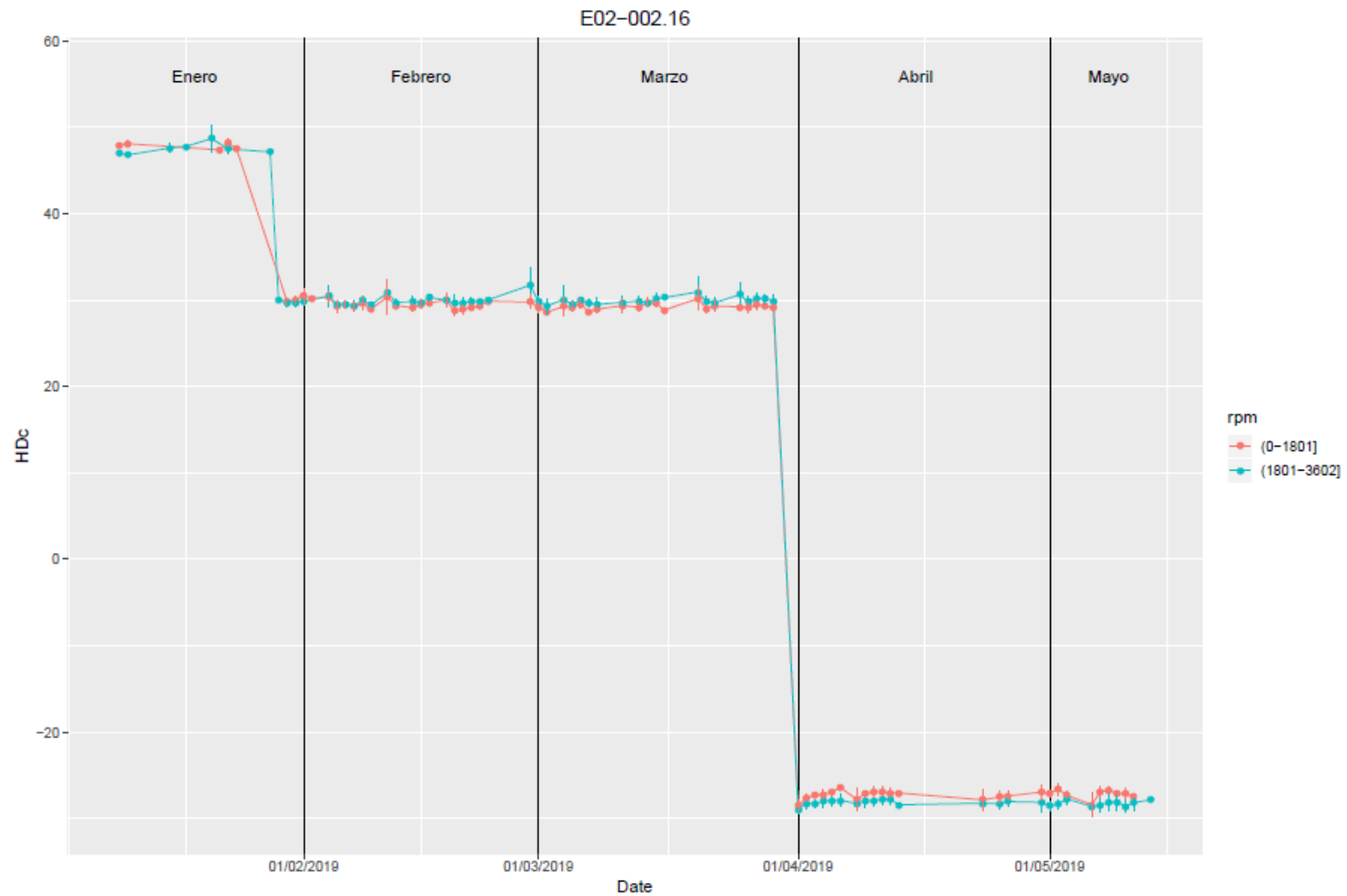


Figura 61. Tendencia HDc punto 16.

ANEXO C. DIAGRAMAS DE CAJAS

A continuación, se introducen unas gráficas que representan el comportamiento de la tendencia HDm mediante diagramas de cajas, en los puntos normalizados restantes:

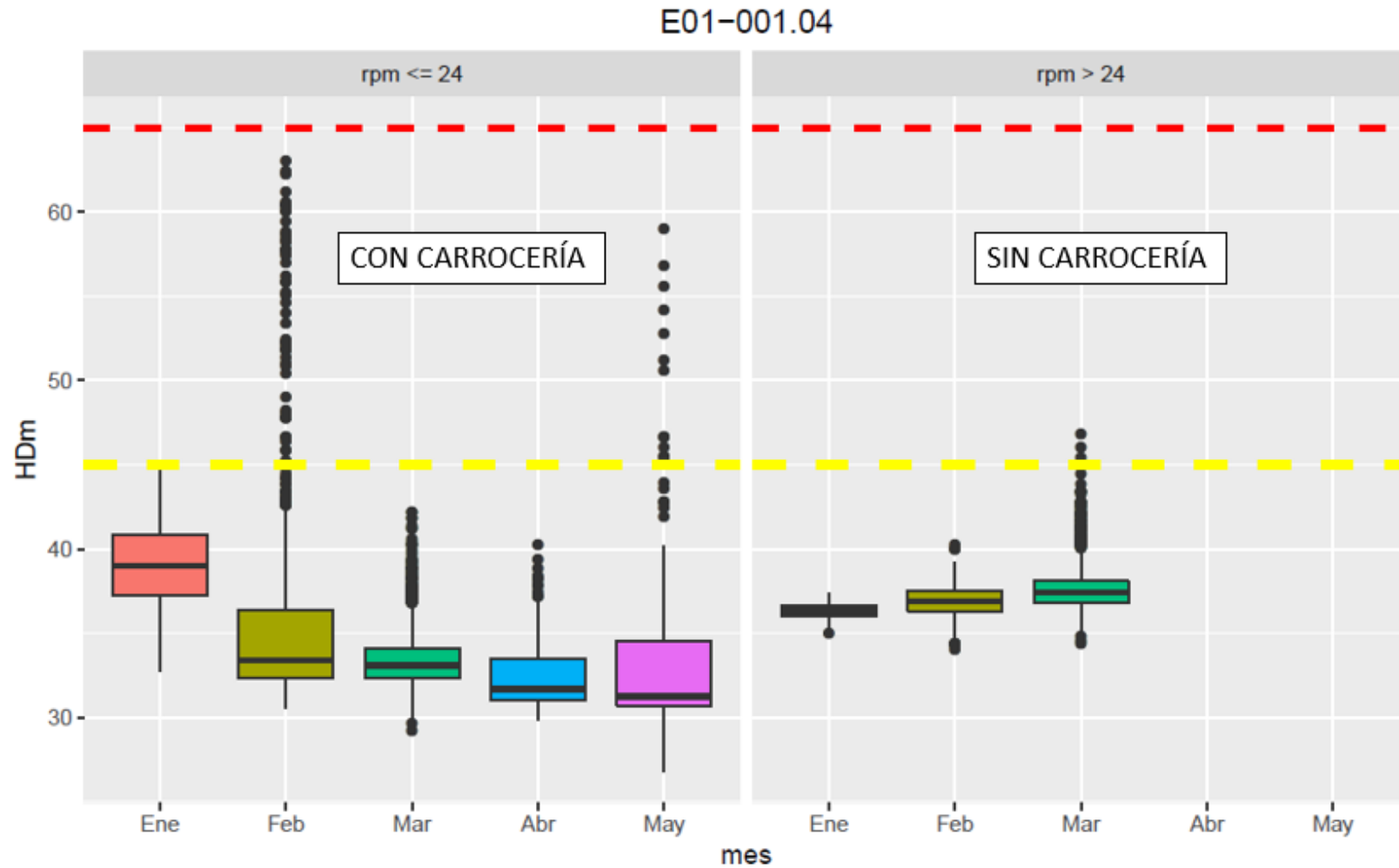


Figura 62. Diagrama de cajas - Tendencia HDm punto 4.

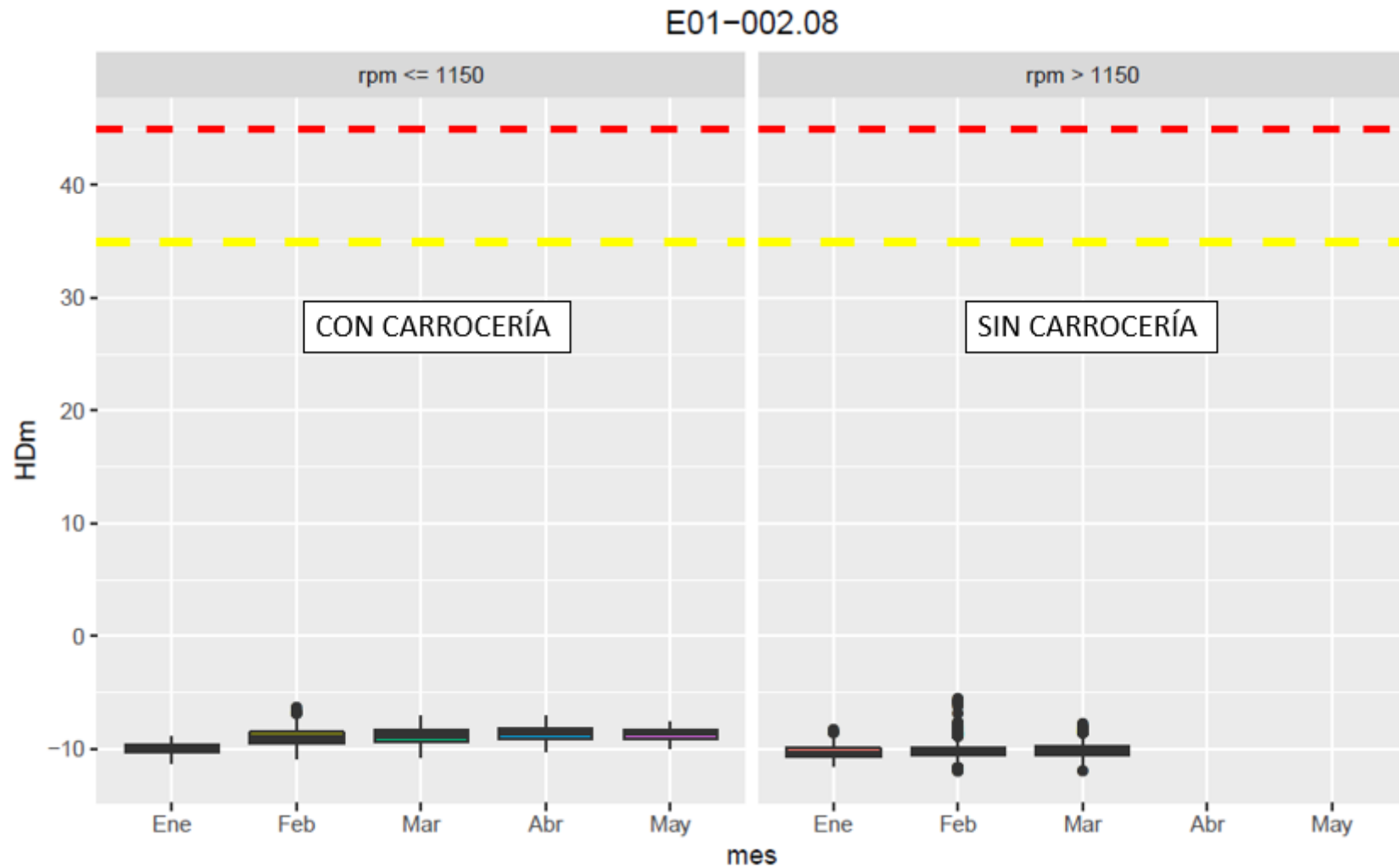


Figura 63. Diagrama de cajas – Tendencia HDm punto 8.

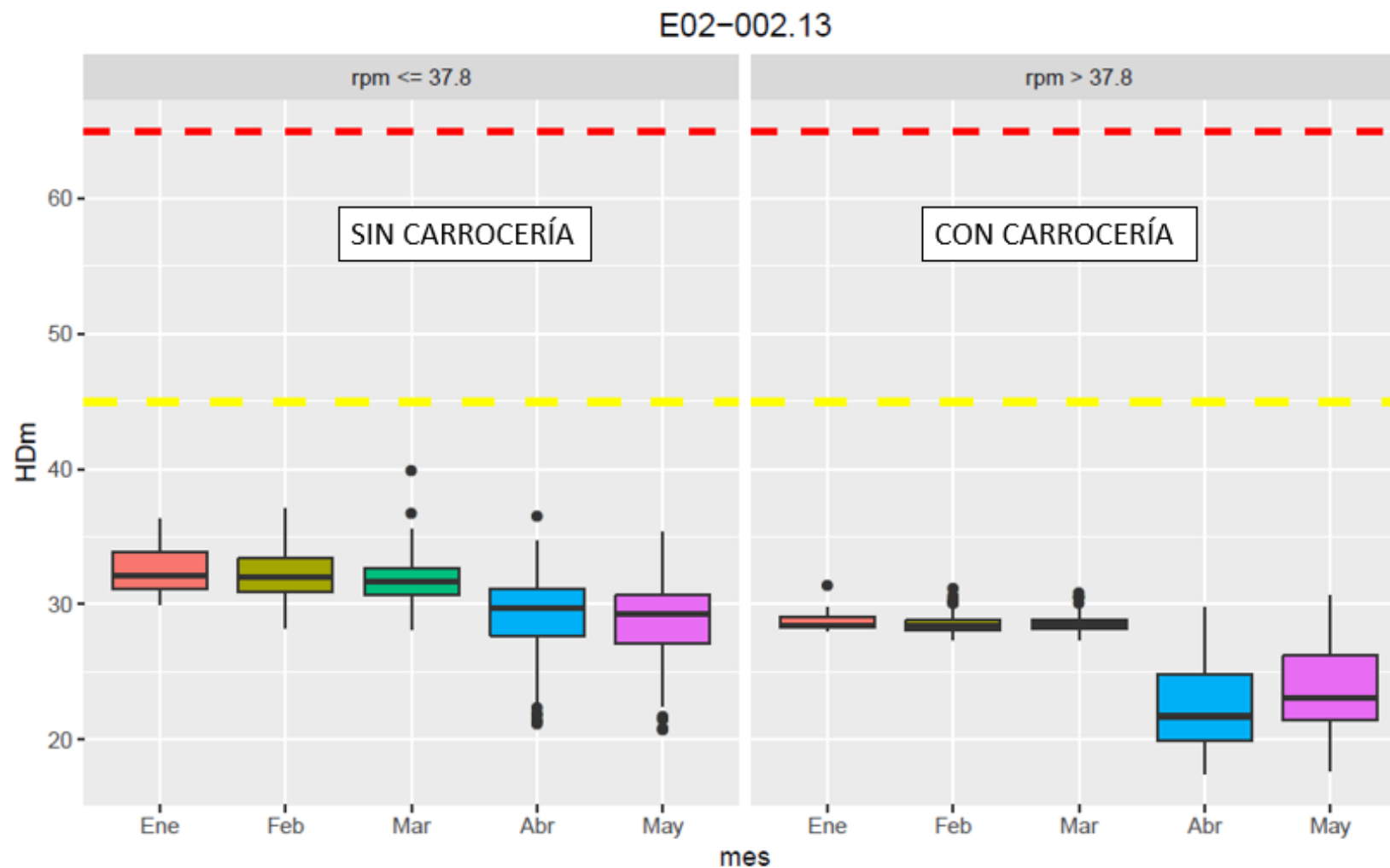


Figura 64. Diagrama de cajas – Tendencia HDm punto 13.

A continuación, se introducen unas gráficas que representan el comportamiento de la tendencia VIB mediante diagramas de cajas, en los puntos normalizados restantes:

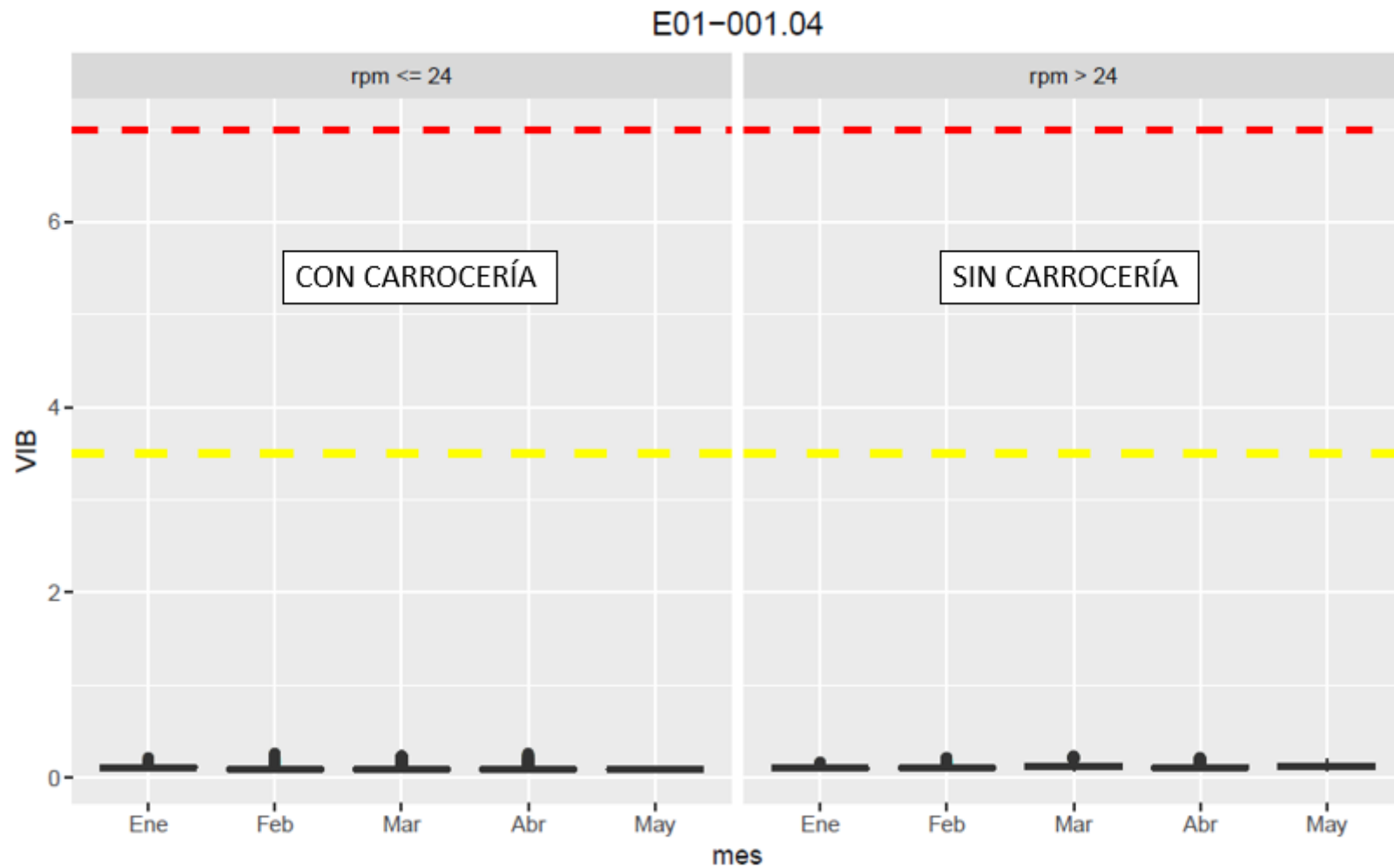


Figura 65. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 4.

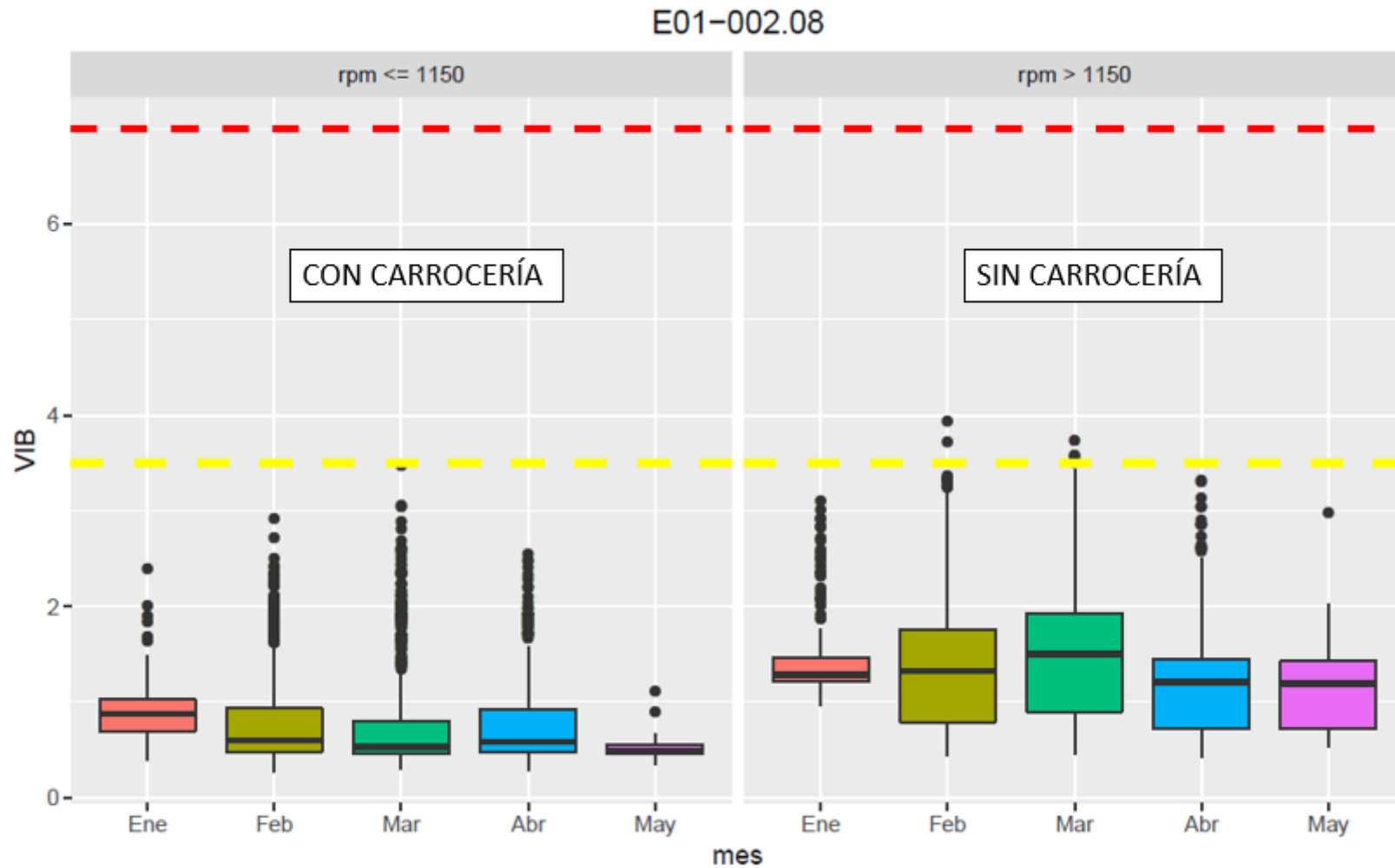


Figura 66. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 8.

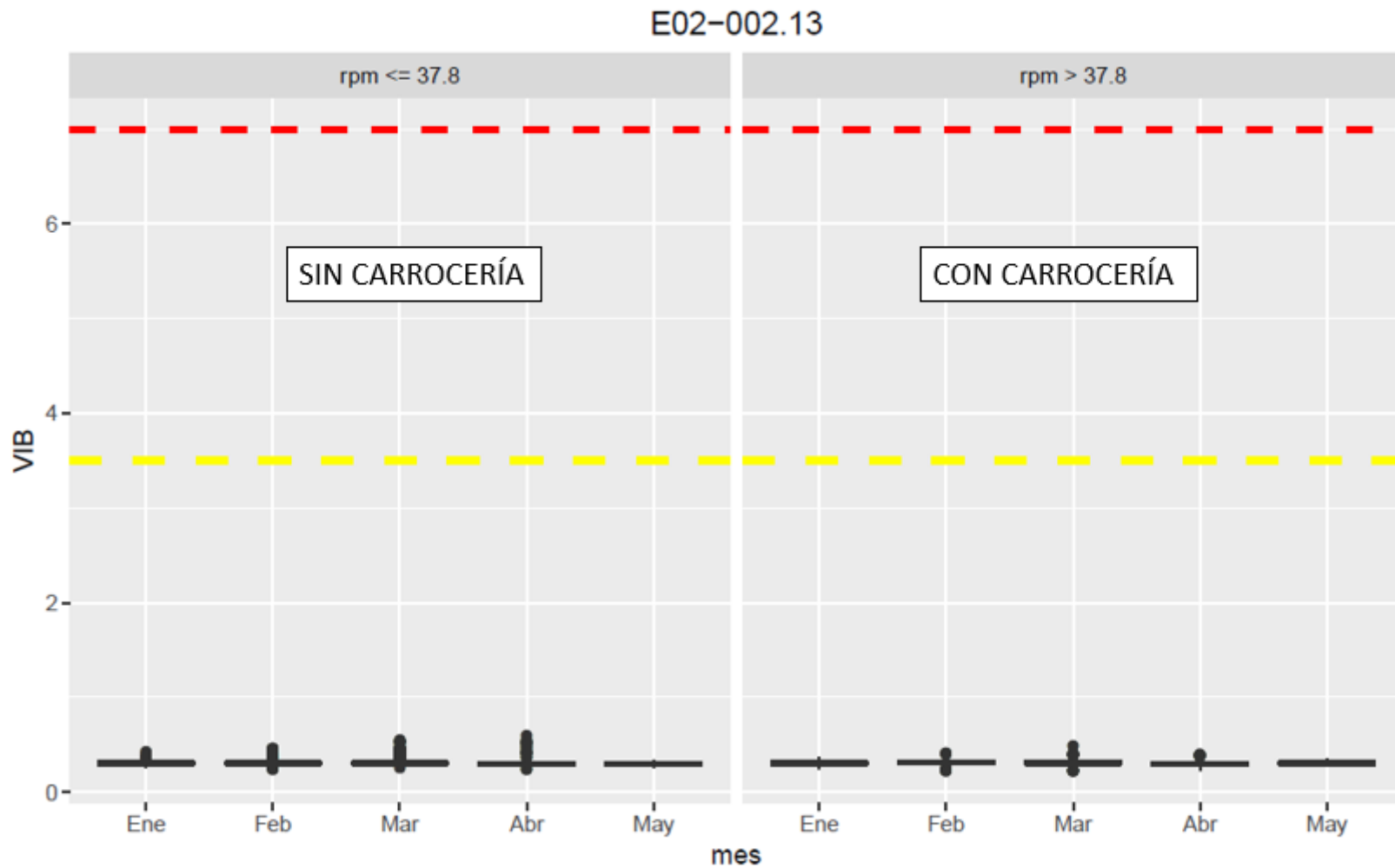


Figura 67. Diagrama de cajas – Tendencia VIB punto 13.

ANEXO D. MATRICES DE GRÁFICOS DE DISPERSIÓN

A continuación, se introducen unas gráficas que representan el comportamiento de los puntos normalizados restantes, mediante matrices de gráficos de dispersión:

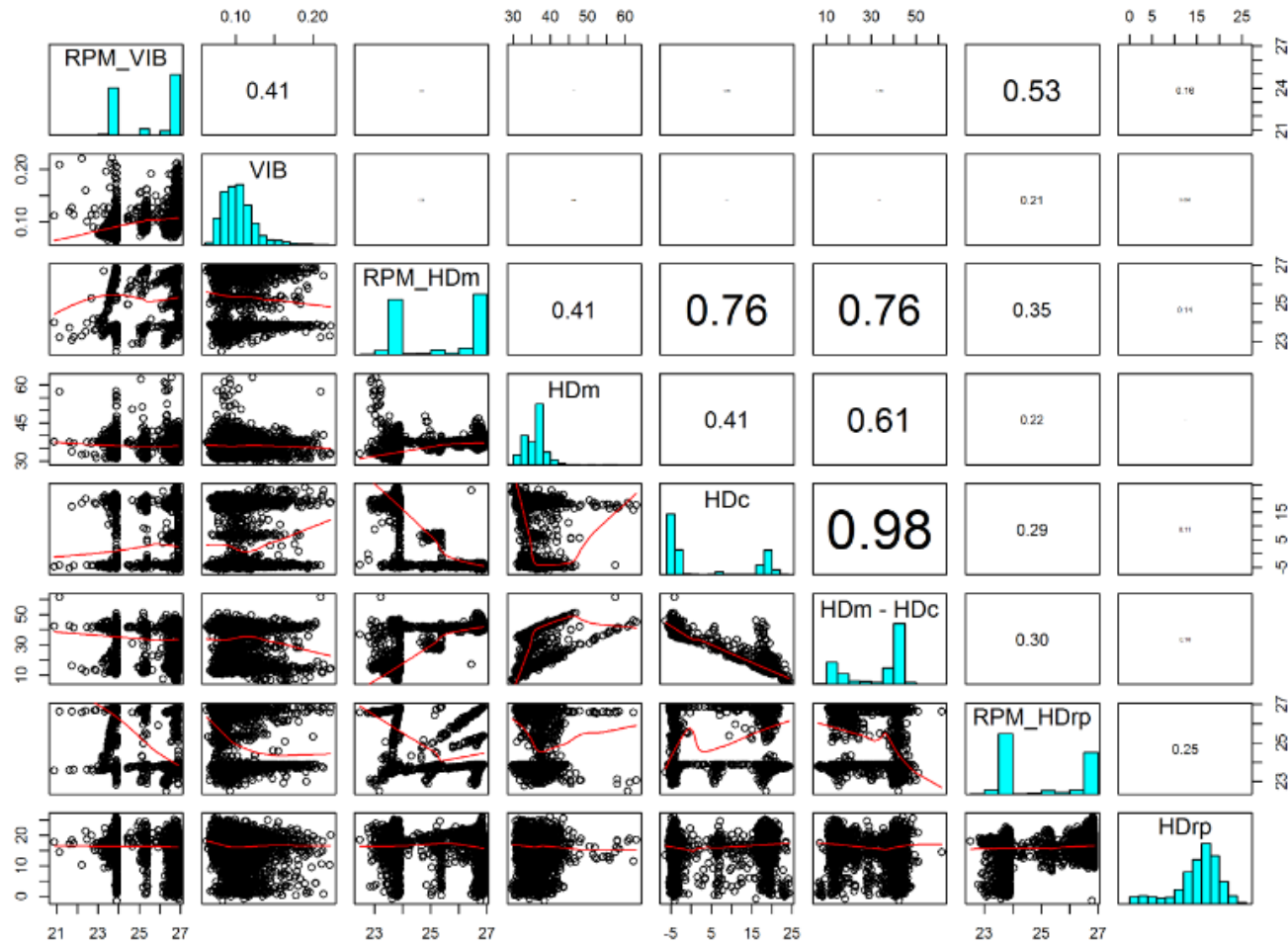


Figura 68. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de tres segundos para el sensor 4 del elevador 1.

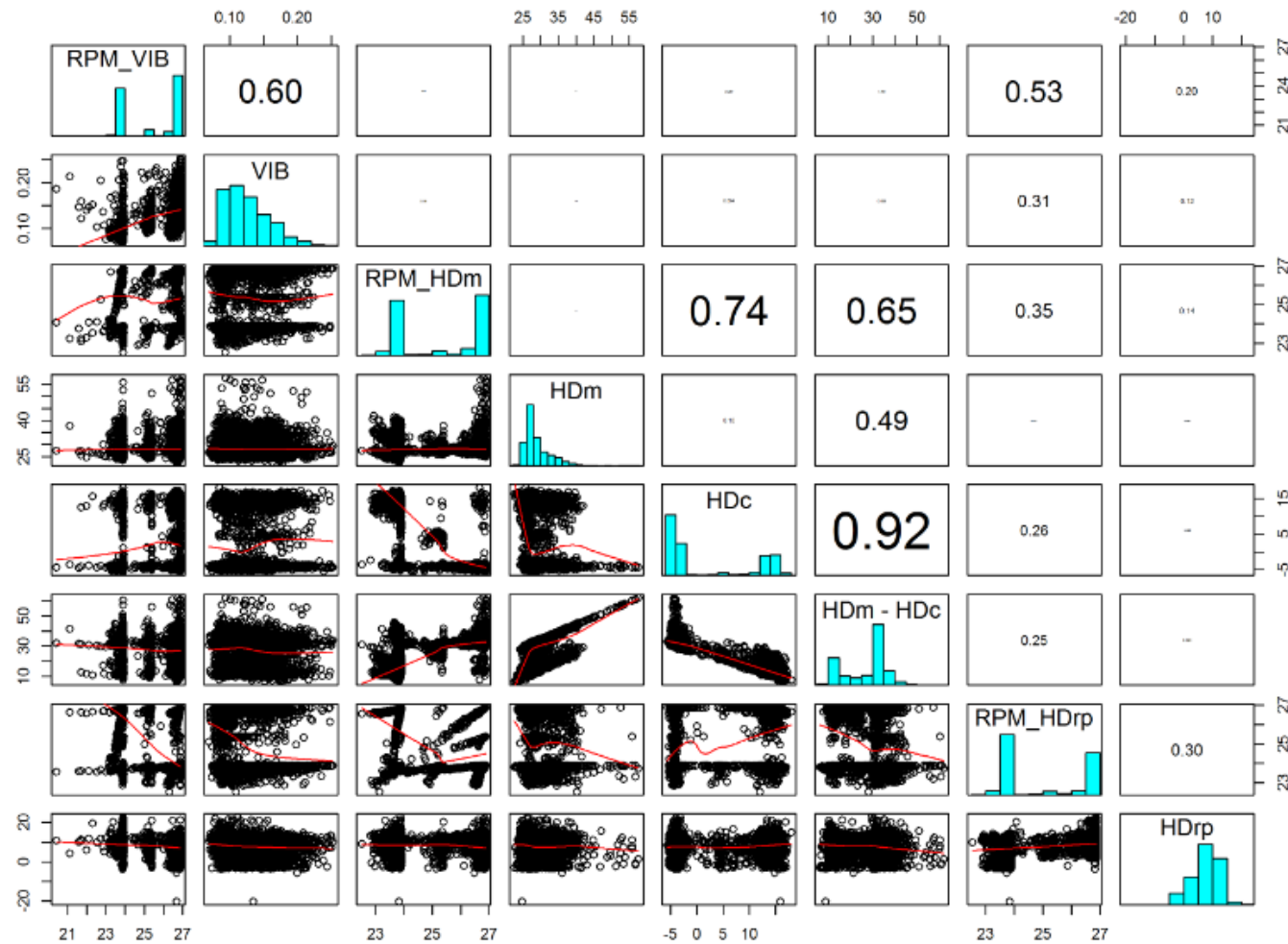


Figura 69. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de tres segundos para el sensor 5 del elevador 1.

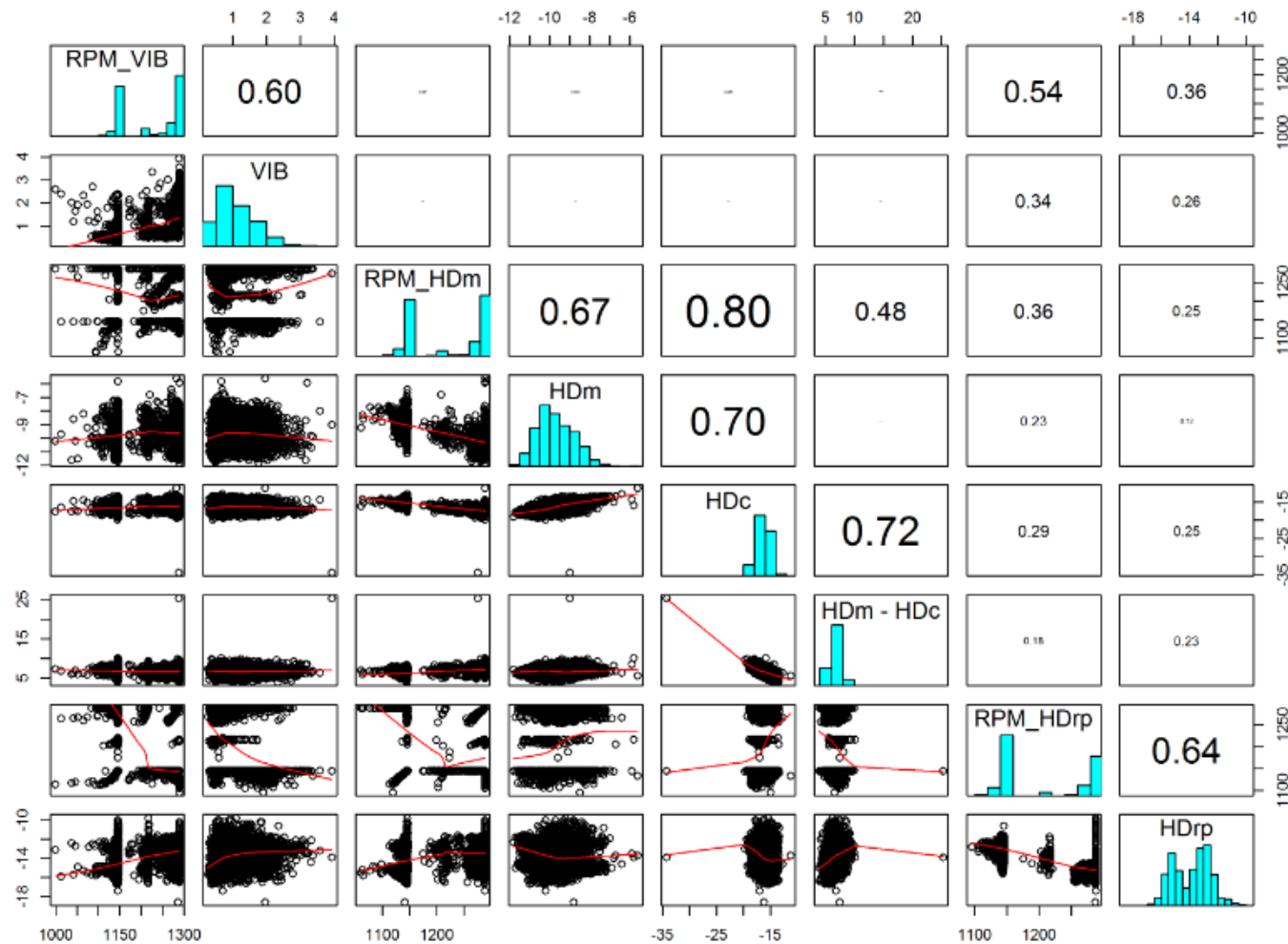


Figura 70. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de tres segundos para el sensor 8 del elevador 1.

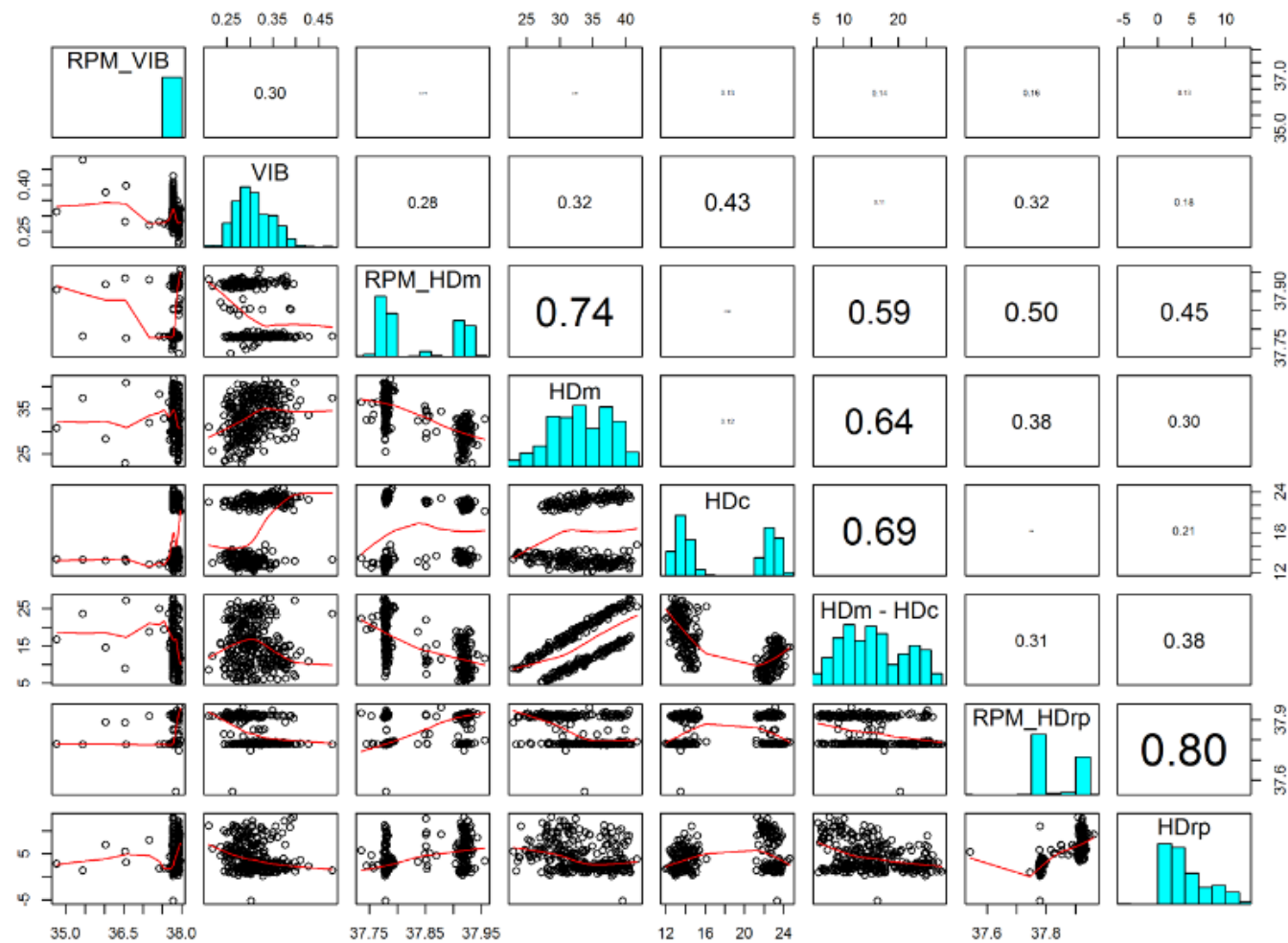


Figura 71. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de cinco segundos para el sensor 12 del elevador 2.

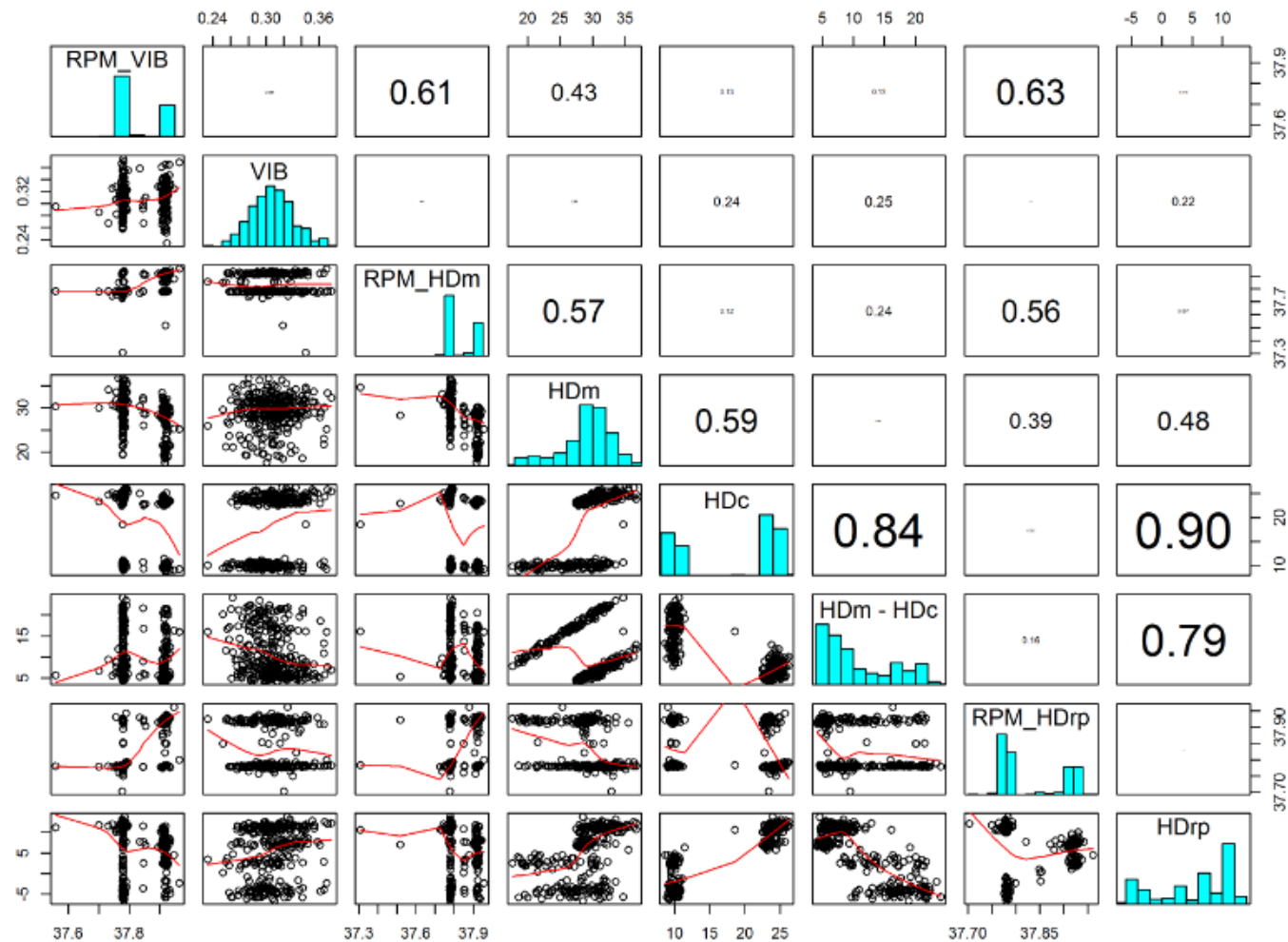


Figura 72. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de cinco segundos para el sensor 13 del elevador 2.

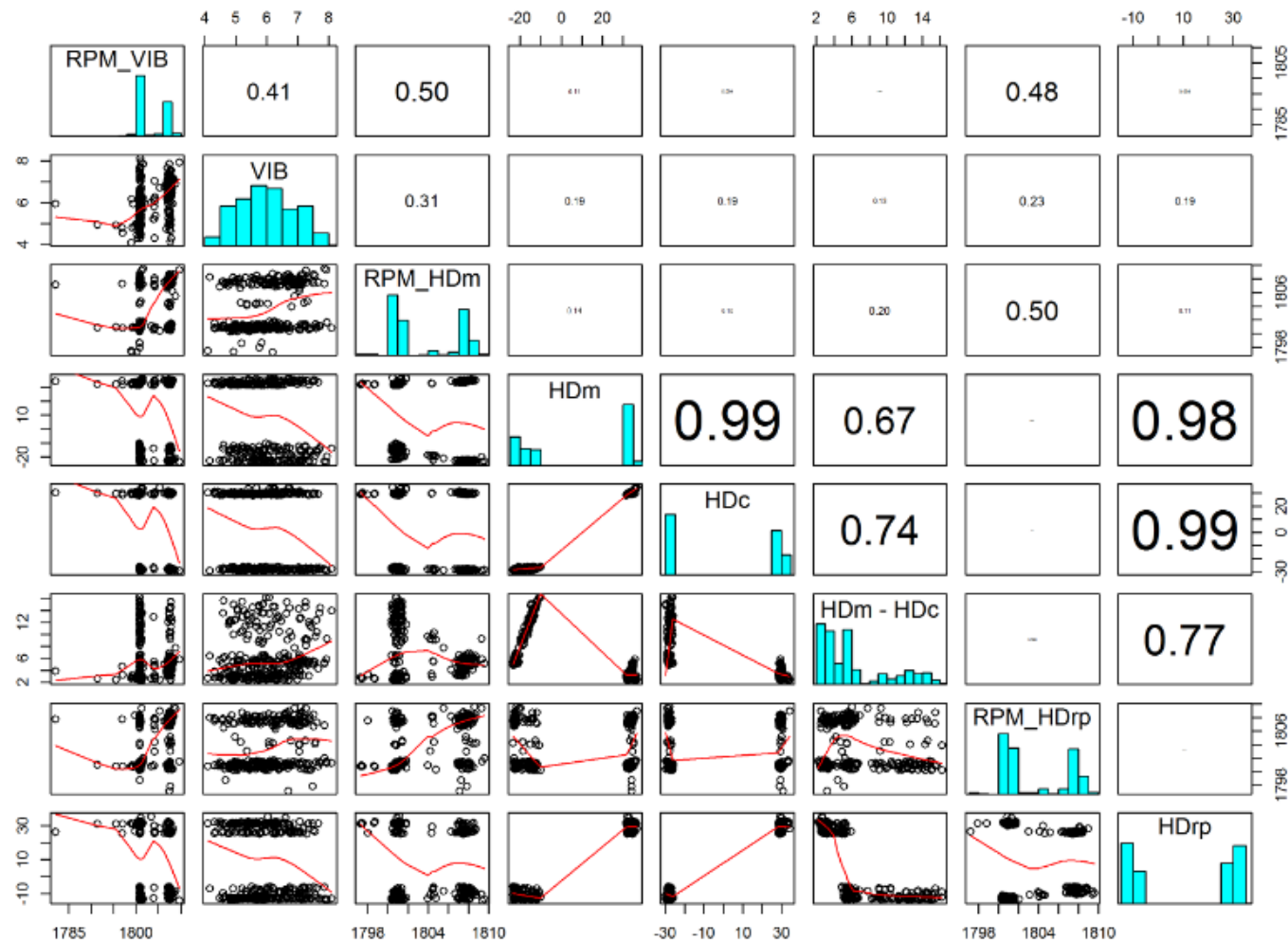


Figura 73. Relaciones entre las variables agrupadas en una ventana temporal de cinco segundos para el sensor 16 del elevador 2